INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Octubre 2020 • N.º 529 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

LOS REYES DEL BOSQUE

La genómica descubre las claves del éxito evolutivo de los robles y las encinas

ECONOMÍA

Las limitaciones del PIB

GRAVEDAD CUÁNTICA

Un nuevo principio para explicar la energía oscura

MEDICINA GENÉTICA

Avances en el tratamiento de enfermedades minoritarias



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

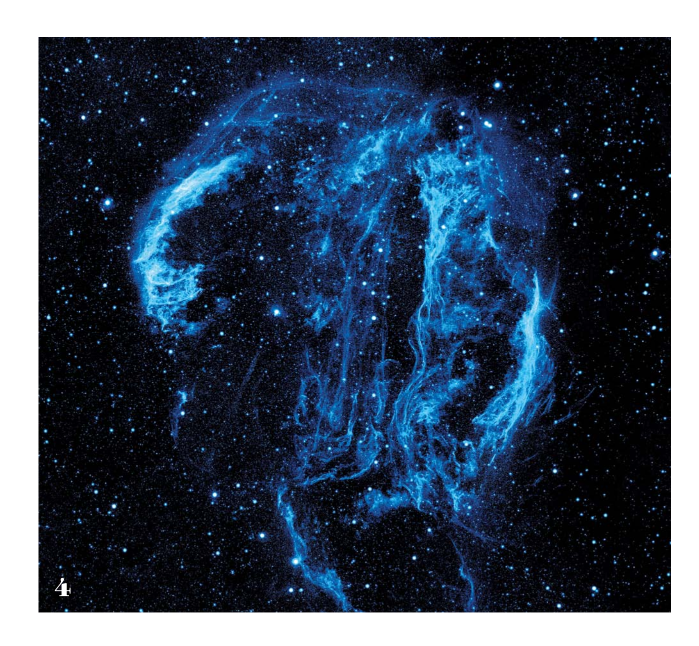
LOS REYES DEL BOSQUE | LAS LIMITACIONES DEL PIB | NUEVOS FÁRMACOS PARA ENFERMEDADES RARAS

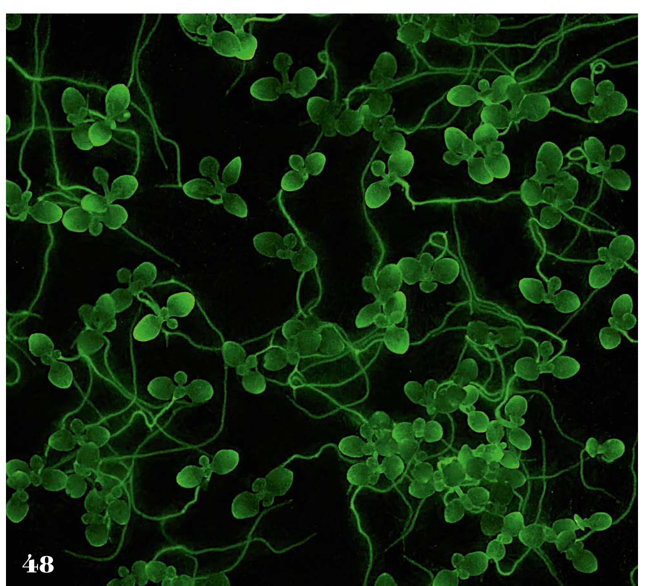
OCTUBRE 2020 N.º 529

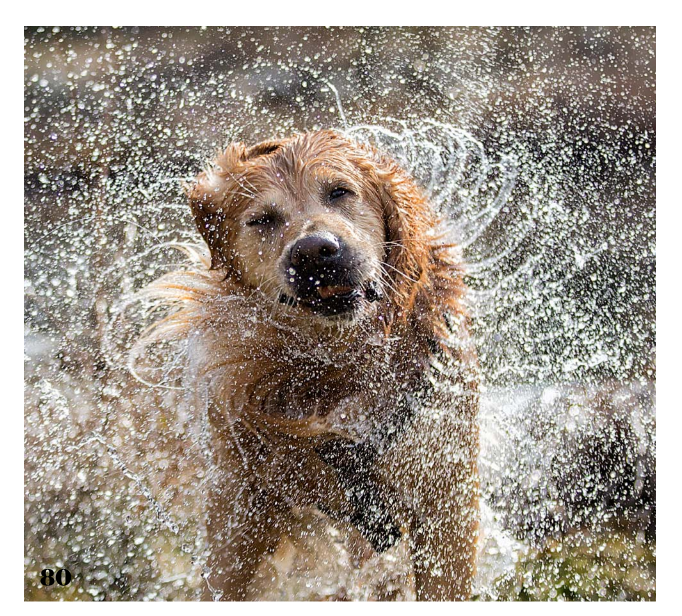


ARTÍCULOS

MATT HARRISON CLOUGH


4


48


80

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES



EN PORTADA



Los robles y las encinas pertenecen a un género de árboles y arbustos enormemente diverso denominado *Quercus*. Está constituido por unas 435 especies que conforman distintos bosques en todo el hemisferio septentrional, en los que desempeñan funciones ecológicas esenciales. Recientes estudios genómicos han permitido a los investigadores trazar sus orígenes y desvelar las claves de su éxito evolutivo. Fotografía de Steve Zimic.

redaccion@investigacionyciencia.es



Julio y agosto de 2020

MÁQUINAS DE VAPOR

En «Retrofuturismo cuántico», de Nicole Yunger Halpern [Investigación y Ciencia, julio de 2020], se menciona que la máquina de vapor fue inventada por Thomas Savery y Thomas Newcomen, y que los científicos de la época se preguntaban «por la eficiencia con que esas máquinas podrían extraer agua de las minas». Es de justicia poner en conocimiento de los lectores de Investigación y Ciencia que, ya en 1606 (es decir, un siglo antes), el navarro Jerónimo de Ayanz patentó la primera aplicación de la energía del vapor para, precisamente, la aireación y desagüe de minas, entre otras funciones. Para quienes estén interesados en la historia técnica e industrial de Hispanoamérica en aquella época, cabe recomendar el libro de Nicolás García Tapia *Del dios del fuego a la máquina de vapor: Introducción de la técnica en Hispanoamérica* (Ámbito Ediciones, 1992).

Juan José Adán
Madrid

Nota de los editores: *Sobre la patente de Ayanz y su relación con los inventos de Savery y Newcomen puede consultarse el artículo de Nicolás García Tapia «Inventores españoles en el Siglo de Oro» [Investigación y Ciencia, septiembre de 1989].*

ÉTICA Y PANDEMIA

En «El triaje de los pacientes COVID-19» [Investigación y Ciencia, agosto de 2020], Marta Consuegra y María Casado recomiendan seleccionar a los pacientes de COVID-19 candidatos a UCI de forma personalizada y bajo criterios éticos, y no solo basándose en la edad. En realidad, el triaje de estos pacientes en nada difiere del que se realiza para el resto de las enfermedades. El intensivista, con la opinión de los demás especialistas, elabora un indicador que tiene en cuenta la gravedad, antecedentes, edad y beneficio potencial del tratamiento. Eso genera un umbral de ingreso en UCI que, en general, poco tiene que ver con cuestiones éticas (por supuesto que no se discrimina por edad u otras razones), sino con la disponibilidad de camas libres.

Dicha disponibilidad depende de los recursos. España dedica entre el 6 y el 7 por ciento del PIB a la sanidad pública, una cantidad sensiblemente inferior a la de otros países del entorno. Es relativamente ingenuo pensar que, en una situación de emergencia sanitaria como la actual, establecer «unos criterios de ingreso [en UCI] claros y homogéneos» evitará la pérdida de confianza en el sistema sanitario. Para garantizar un umbral generoso de ingreso en UCI, parece imprescindible mejorar la financiación del sistema público de salud y aumentar la disponibilidad de camas. Supeditar el ingreso a las resoluciones de comités de ética asistencial podría burocratizar y enlentecer el proceso. La gran profesionalidad y formación del personal sanitario les permite asumir la carga emocional de tales decisiones. Sospecho que llevan peor no disponer del equipamiento de protección adecuado.

Pedro David Delgado López
Médico del servicio de neurocirugía del Hospital Universitario de Burgos y presidente de la Sociedad Castellanoleonesa de Neurocirugía

Considero que el enfoque ético no responde a la realidad de la nueva ola de COVID-19 a la que posiblemente habremos de enfrentarnos. En primer lugar, creo que para tratar la cuestión del triaje en dicha situación, debería abandonarse el contexto suave, donde la utilidad de los recursos invasivos guarda un cierto equilibrio con sus inconvenientes, y plantearse situaciones en las que las decisiones determinarán quién seguirá vivo y quién no, seleccionando entre personas que antes estaban dentro de la normalidad en todos los sentidos.

En segundo lugar, la situación no es asimilable a una catástrofe imprevista, ya que las autoridades han tenido tiempo de proveer de recursos al sistema sanitario. Por tanto, la decisión sobre quién podrá hacer uso de esos recursos, si llegasen a faltar, debería provenir de las mismas entidades que han determinado en qué cantidad estarán disponibles. Delegar esa función en comités de sanitarios en los propios hospitales, además de obligarles a asumir decisiones muy duras que no les corresponden y que podrían acarrearles responsabilidades penales, supone extender una cortina de humo sobre la realidad, con lo que podrían no adoptarse nuevas medidas necesarias.

Con todo, la consecuencia más grave de esta forma de proceder sería la repercusión negativa que tendría en el sentir de la población, que no solo perdería confianza en el sistema sanitario, sino también en el propio personal médico. Quien acude enfermo a un hospital necesita estar seguro de que va a encontrar ayuda, no un tribunal que decida sobre su vida o muerte. Si no, muchos optarán por morir en su casa.

Francisco López Gomáriz
L'Hospitalet, Barcelona

Erratum corrige

En el artículo **Los secretos de un superviviente antártico** [por Douglas Fox; Investigación y Ciencia, septiembre de 2020], los rotulados *Antártida Oriental* y *Antártida Occidental* del recuadro de la página 61 están mal colocados y deben intercambiarse entre sí. Agradecemos a nuestro lector Santiago Martí Santos por habérnoslo advertido.

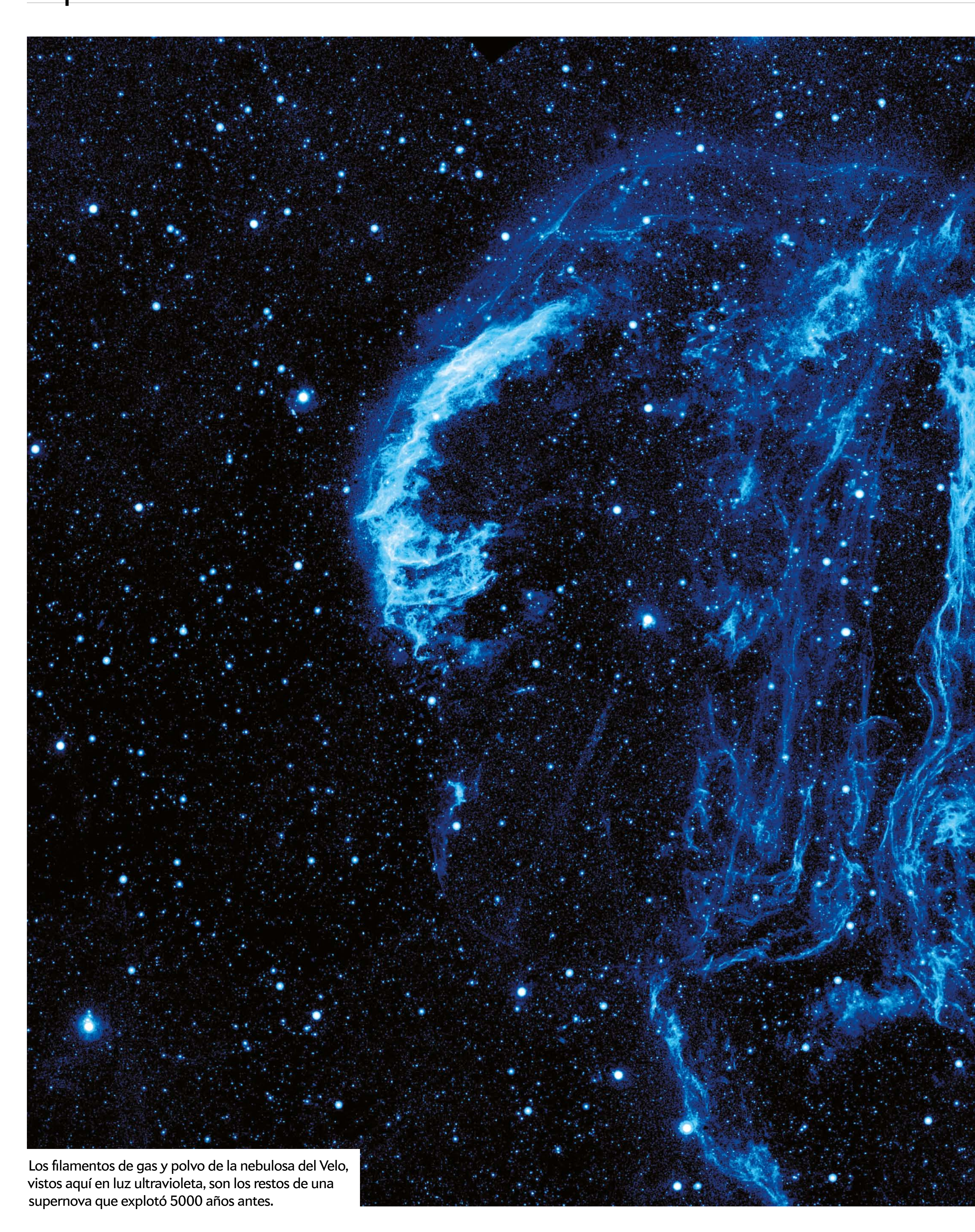
Este error ha sido corregido en la edición digital del artículo.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes



Los filamentos de gas y polvo de la nebulosa del Velo, vistos aquí en luz ultravioleta, son los restos de una supernova que explotó 5000 años antes.

NASA, JPL E INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE CALIFORNIA

ASTRONOMÍA

Supernovas en el laboratorio

Un pequeño experimento reproduce las explosiones de las estrellas masivas

Cuando una estrella explota al final de su vida, esparce a través del espacio los elementos que ha forjado en su interior y da lugar a espectaculares «remanentes de supernova», restos de gas y polvo cuyas estructuras llevan tiempo desconcertando a los científicos. Pero en la Vía Láctea solo se producen una o dos supernovas por siglo, a menudo sin previo aviso, lo que dificulta el estudio de sus primeros instantes. Los investigadores han tratado de reproducir esos eventos mediante simulaciones, pero las limitaciones computacionales obligan a hacer suposiciones sobre los detalles más sutiles.

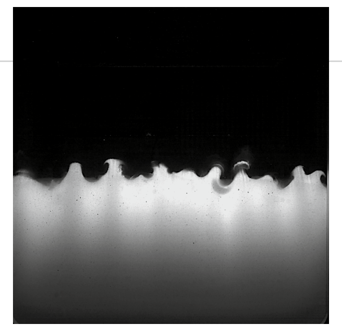
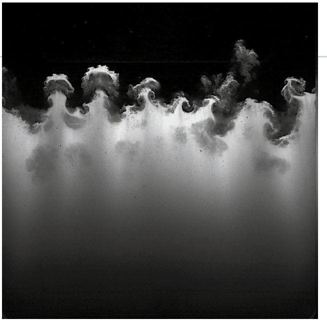
Un equipo del Instituto Tecnológico de Georgia espera remediarlo con un nuevo experimento para estudiar cómo se mezclan los gases en una supernova, el cual podría ayudar a validar y refinar las simulaciones. Su aparato en forma de cuña, que mide unos 120 centímetros en la parte superior y es el doble de grueso que una puerta, encierra dos gases inertes separados y permite recrear la dinámica que tendría lugar en una sección cilíndrica o esférica del espacio. El equipo detona explosivos comerciales en la punta de la cuña, que representa el centro de una supernova, y la onda expansiva mezcla los dos gases. Una cámara de alta velocidad captura instantáneas del proceso cada 0,1 milisegundos, que revelan el equivalente a la primera hora tras la explosión de una supernova. Los investigadores describieron el experimento el pasado junio en *The Astrophysical Journal*.

Los científicos observaron que la onda expansiva amplifica las pequeñas fluctuaciones producidas en la línea donde se encuentran los dos gases, creando perturbaciones en forma de hongo que crecen muy deprisa. Estos remolinos gaseosos generan turbulencias que acaban dando lugar a burbujas de baja densidad y largas puntas de alta densidad. Si una punta viaja a sufi-

ciente velocidad, puede desprenderse y actuar como una bala que perfora varias capas de gas.

Los investigadores han cavilado mucho sobre las corrientes de elementos pesados procedentes de las profundidades de las supernovas, que se comportan de manera similar a esas puntas. «No está claro si lo que vemos se debe a la naturaleza intrínseca y asimétrica de la explosión o a las turbulencias generadas», señala Anthony Piro, astrofísico teórico de los Observatorios Carnegie, en Pasadena, ajeno a la investigación. El nuevo estudio muestra que las turbulencias podrían jugar un papel muy importante, añade Piro, aunque hay que hacer más pruebas para determinar las limitaciones del modelo.

La mayoría de los modelos de supernovas incluyen suposiciones básicas sobre lo que ocurre a las escalas más pequeñas, lo que conlleva un ahorro de semanas en el tiempo de cálculo, explica Piro. La nueva investigación permitirá evaluar dichos supuestos. Los científicos ahora «pueden ver la evolución de diversas estructuras a escalas más pequeñas», confirma Carolyn Kuranz, física de la Universidad de Michigan que tampoco participó en el trabajo. Las estructuras creadas en el experimento recuerdan a las que ella misma ha encontrado en sus estudios sobre la mezcla de plasmas: «La teoría predecía que debían ser parecidas, y resulta que lo son.»


Expansión de los gases en los milisegundos posteriores a una explosión de supernova simulada.

Según Piro, el experimento «ratifica buena parte de la física» relacionada con las supernovas. Además, ayudará a calibrar los modelos con los que él trabaja y permitirá a los científicos interpretar mejor las observaciones de las supernovas y sus remanentes.

La construcción de una supernova en miniatura planteaba numerosos retos. La gravedad de la Tierra es mucho más débil que la de una estrella moribunda, y los explosivos comerciales generan mucha menos energía. Sin embargo, «aunque la detonación es menor, lo mismo ocurre con el resto de factores, así que las proporciones se mantienen», comenta Benjamin Musci, estudiante de doctorado del Instituto de Tecnología de Georgia y primer autor del artículo.

Impedir que los gases rebotasen en las paredes del dispositivo (las cuales, obviamente, no existen en el espacio) «supuso una larga y ardua batalla», rememora Musci. Le llevó casi un año hallar una solución, que sorprende por su sencillez: revestir las paredes con la espuma del embalaje de un ordenador nuevo, un material que absorbe los gases y evita que se reflejen. «De vez en cuando, el explosivo hace pedazos la espuma y nos retrasa», añade. «Pero sin ella, la física del sistema sería muy diferente.»

Otro motivo de preocupación es la dimensionalidad del experimento. Piro observa que los gases que se expanden en dos dimensiones forman remolinos más grandes y tardan más tiempo en separarse que los que se mueven en el espacio. Esta es una cuestión que los investigadores podrían abordar en el futuro.

Los anteriores experimentos de supernovas se realizaron a escalas mayores, según el investigador principal del estudio, el astrofísico del Instituto de Tecnología de Georgia Devesh Ranjan. En centros como el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, decenas de láseres apuntan a un material del tamaño de

GEOFÍSICA

Prospecciones a distancia

El grosor de la litosfera revela dónde podría haber yacimientos metálicos

El cobre, el plomo y el zinc son esenciales para los componentes electrónicos y las baterías de los dispositivos modernos. Su demanda se ha disparado, y las compañías mineras agotan los yacimientos antes de que los prospectores puedan descubrir otros nuevos. Pero un equipo internacional de científicos ha hallado una relación entre los yacimientos de esos metales y el grosor de la litosfera (la capa de la Tierra que comprende la corteza y la parte más superficial del manto), que ofrece una manera fiable de localizar esos recursos cruciales.

El proyecto comenzó por casualidad, rememora Mark Hoggard, primer autor del estudio y geólogo en las universidades de Columbia y Harvard. Otro de los autores, Karol Czarnota, investigador de la agencia gubernamental Geoscience Australia, mencionó durante una visita a Harvard que los yacimientos metálicos del norte de Australia parecían situarse en regiones donde variaba el espesor de la litosfera, y se preguntaba por qué. El equipo descubrió que esa asociación se observa en todo el mundo, lo que da pistas sobre otros lugares donde buscar minerales ocultos. Su estudio, publicado en julio en *Nature Geoscience*, explora de manera exhaustiva la correlación entre los yacimientos metálicos conocidos y el grosor de la litosfera, y propone un mecanismo para explicarla.

La litosfera puede extenderse hasta 300 kilómetros bajo la superficie, y eso hace que su espesor sea «muy difícil de calcular para los geofísicos», explica Maureen Long, geofísica de la Universidad Yale que no participó en el estudio. La estrategia habitual es emplear datos sismográficos para hallar la velocidad con que las vibraciones símicas atraviesan el planeta. Pero, como lamenta Long, «nuestra capacidad para inferir la estructura de la Tierra se ve limitada» por el escaso número de terremotos y sismómetros.



Mina de cobre en Salt Lake City, Utah.

A fin de elaborar un mapa de alta resolución del grosor de la litosfera en todo el mundo, Hoggard y su colaboradores combinaron y calibraron modelos regionales y globales ya existentes, a los que añadieron datos de temperatura y presión procedentes de las rocas litosféricas expulsadas a la superficie en las erupciones volcánicas. Descubrieron que los yacimientos metálicos tienden a aparecer en zonas donde el espesor de la litosfera es de unos 170 kiló-

DEVESH RANJAN, STAM LAB E INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE GEORGIA (*gases*); PAVISHA, GETTY IMAGES (*mina*)

una goma de borrar y lo evaporan, desencadenando una explosión formidable.

Pero eso exige sacrificar los detalles, prosigue Ranjan: los experimentos más grandes generan pocas imágenes, en las que solo se vislumbran las estructuras producidas. En cambio, el dispositivo en forma de cuña toma 200 fotografías en unos pocos segundos, mientras se mezclan los gases. «Nuestro experimento ofrece una visión dinámica de todo el proceso», asegura Ranjan. Al juntar los resultados de ambos tipos de experimentos, «deberíamos ser capaces de explicar lo que ocurre en una supernova real».

A Piro no le sorprende que el nuevo experimento sea el primero de ese estilo. «Hay que ser un experto en todo tipo de técnicas experimentales para montar algo así», valora. «La creatividad que ha mostrado este grupo al tratar de abordar esos problemas en un laboratorio es realmente inspiradora.»

Combinar este estudio con otros que exploran aspectos diferentes de las supernovas y con los modelos teóricos ayudará a los investigadores a esclarecer detalles que no pueden observar cuando explota una estrella real. «Si el objetivo último es desarrollar un modelo universal que describa lo que sucede a distintas escalas», concluye Kuranz, «emplear estos experimentos, sobre todo con condiciones y escalas diferentes, nos puede acercar a él».

—Nola Taylor Redd

metros. En cuanto a los motivos, apuntan que los componentes básicos de los metales suelen acumularse en cuencas próximas a la superficie terrestre. Si esas cuencas se sitúan sobre una región de la litosfera con el grosor adecuado, el calor que asciende desde del manto podría crear la temperatura perfecta para que los componentes se concentren y formen yacimientos.

Hoggard subraya que encontrar esos metales siempre ha requerido «trabajo de campo»: personas que tomen muestras para determinar el contenido mineral del suelo o midan el campo magnético terrestre en busca de anomalías. El nuevo hallazgo ofrece la posibilidad de identificar enclaves prometedores a distancia, y las compañías mineras ya han comenzado a usarlo para optimizar sus búsquedas, asegura Hoggard.

«Lo más novedoso del estudio es que conecta estructuras profundas del manto superior con algo que podemos ver cerca de la superficie, como es la distribución de los yacimientos metálicos», concluye Long. «Es un trabajo francamente interesante.»

—Karen Kwon



GETTY IMAGES

GENÉTICA

Las numerosas mutaciones del tomate

Nuevas investigaciones identifican la enorme diversidad genética de esta hortaliza

El tomate adopta multitud de formas, tamaños y sabores. Ahora, un nuevo estudio basado en técnicas punteras de secuenciación del ADN ha logrado trazar por fin la base genética de tales diferencias. La comparación de las secuencias genéticas de 100 variedades de tomate ha revelado una cantidad asombrosa de variaciones en su ADN: más de 230.000.

Averiguar cómo esas mutaciones modifican los tomates dará a los mejoradores y a los científicos nuevas herramientas para refinar esta hortaliza y otras, explica Zachary Lippman, biólogo vegetal en el Laboratorio de Cold Spring Harbor, en Nueva York, y uno de los autores del estudio, publicado en julio en *Cell*. Lippman y sus colaboradores secuenciaron y compararon los genomas de tomates muy diversos, de antiguas variedades casi desaparecidas y silvestres, así como de otras modernas. Usaron una técnica denominada secuenciación de lectura larga para localizar segmentos grandes de ADN que habían sido copiados (duplicaciones), suprimidos (eliminaciones) o desplazados a otro lugar (traslocaciones). Las técnicas precedentes no permitían descubrir esos cambios estructurales importantes en el genoma del tomate, pues solo leían pequeños fragmentos al mismo tiempo.

Se sabía que el ADN de una especie puede presentar variaciones estructurales notables. Pero esta es la primera determinación exhaustiva de su extensión y naturaleza, afirma el biólogo Jim Giovannoni del Instituto Boyce Thompson, en Nueva York, que no ha participado en el estudio.

Una vez los investigadores identificaron las cuantiosas mutaciones, examinaron su influencia en las características de la hortaliza. Eligieron tres cualidades: el sabor, el tamaño y la facilidad de recolección. En una prueba, el equipo descubrió un gen que confiere un sabor ahumado, lo cual ofrece a los mejoradores una cualidad que podría ser acentuada o suprimida a voluntad. En otro experimento modificaron la estructura del ADN y alteraron el tamaño del fruto. Lo consiguieron multiplicando las copias de cierto gen con la herramienta de edición génica CRISPR. Por último, investigaron de qué modo ciertas variaciones influyen en un carácter que facilita la recolección de los tomates pero reduce la producción. Los autores muestran cómo cuatro variaciones estructurales modifican genes relevantes que mantienen la fácil recolección sin rebajar la productividad, y crean un protocolo de selección para lograr dicho equilibrio.

El estudio «revela miles de otras variaciones estructurales asociadas a genes que explican numerosos rasgos importantes del tomate y sobre los que ahora se puede actuar, como la respuesta a las enfermedades, la tolerancia al estrés, el rendimiento y la calidad», afirma Giovannoni. Saber en qué gen hay que incidir para modificar un carácter es el «santo grial» para cualquier fitomejorador o genetista, afirma Lippman, quien destaca que estudios como este pueden sentar la base para la mejora de las especies cultivadas mediante un cambio preciso y de resultados predecibles.

—Harini Barath

MEDIOAMBIENTE

Contaminación letal

Un análisis estadístico subraya el peligro de las partículas en suspensión



El puente de la bahía de San Francisco, oculto tras el humo del incendio Camp.

En 2018, mientras el incendio Camp arrasaba California, el cielo se llenó de hollín y otros contaminantes. La concentración de partículas en suspensión superó con creces los 12 microgramos por metro cúbico (μg/m^3), situándose en el intervalo «insalubre» de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de EE.UU. Y en algunos lugares se disparó hasta cientos de μg/m^3.

Estos «miasmas» incluían partículas con un diámetro menor o igual a 2,5 micras, las conocidas como $PM_{2,5}$, que también son generadas por los vehículos o las centrales térmicas al quemar combustibles fósiles. El minúsculo tamaño de estas partículas les permite penetrar en los pulmones y causar problemas respiratorios a corto plazo. Miles de estudios avalan que pueden agravar el asma y las relacionan con las enfermedades cardiovasculares o el bajo peso neonatal. Aunque existe un amplio consenso médico al respecto, algunos miembros de un comité de la EPA (reestructurado por la administración Trump), junto con los asesores del sector del petróleo y el gas, afirman que los estudios no demuestran una relación causal. Francesca Dominici, bioestadística de la Universidad Harvard, y sus colaboradores abordan esta cuestión en un estudio publicado en julio en *Science Advances*. Los investigadores aseguran que su trabajo aporta abundantes pruebas de la relación entre la contaminación del aire y las muertes prematuras.

Los estudios de la contaminación atmosférica suelen basarse en análisis de regresión, un método estadístico para determinar la probabilidad de que un factor concreto, como la contaminación del aire, influya en un resultado (en este caso, la mortalidad). Pero muchas veces no está claro que los modelos consideren de manera adecuada otros posibles factores. En su artículo, el equipo de Dominici aplicó cinco métodos estadísticos, incluido un análisis de regresión, a un conjunto de 570 millones de datos procedentes de 68,5 millones de beneficiarios de Medicare (el sistema de asistencia médica de EE.UU. para mayores de 65 años) y recogidos a lo largo de 16 años. Su técnica ayudó a separar el efecto de las partículas en suspensión de otros factores y se asemejó a un experimento

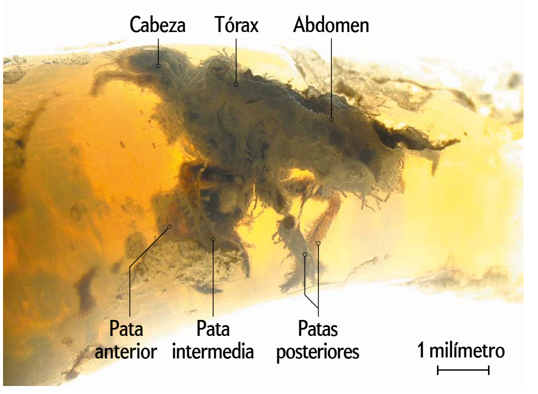
PALEONTOLOGÍA

Un insecto conservado en un ópalo

Un fósil excepcional da pistas sobre dónde buscar las primeras formas de vida

Un insecto atrapado en una gema preciosa puede ofrecer nuevas indicaciones en la búsqueda de vida arcaica en la Tierra y Marte. El espécimen de ópalo, extraído de una roca hallada en Indonesia y apodado «Beverly», contiene el exoesqueleto de una diminuta ninfa de cigarra. El pasado junio, los descubridores explicaron su proceso de formación en *Scientific Reports*.

No es el primer fósil opalificado descubierto en las rocas silíceas que se forman cerca de los géiseres, explica Boris Chauviré, geólogo en la Universidad de los Alpes en Grenoble. El agua caliente disuelve la roca, y cuando el líquido rico en silicatos se enfría, se endurece y crea la gema reluciente. En ocasiones rellena los espacios dejados por organismos en descomposición o el cuerpo de animales diminutos que han quedado atrapados. Lo singular es que este fósil procede del suelo formado por la erosión de rocas volcánicas, y es el primer animal descubierto en ópalo formado de ese modo. Ahora que sabemos que esto es posible, dice Chauviré, el fenómeno señala nuevos lugares donde buscar antiguos vestigios de vida.



De hecho, este tipo de opalificación es más común que el proceso hidrotermal, pero dada su lentitud se consideraba menos probable que pudiese conservar restos biológicos. Sin embargo, el equipo ha descubierto que el exoesqueleto está recubierto por una capa de zeolita, un mineral silíceo; el análisis indica que esta sustancia cristalizó sobre la cutícula mientras el insecto permanecía enterrado en el suelo y se hallaba expuesto al agua con silicatos, lo que conservó su estructura antes de que el líquido circundante acabara formando el ópalo.

MICHAEL SHORT, GETTY IMAGES (*puente*); DE «ARTHROPOD ENTOMBMENT IN WEATHERING-FORMED OPAL: NEW HORIZONS FOR RECORDING LIFE IN ROCKS», BORIS CHAUVIRÉ ET AL., EN *SCIENTIFIC REPORTS*, VOL. 10, ARTÍCULO N.º 10575, 2020 (*fósil*)

aleatorizado (la prueba de referencia para establecer causa y efecto, que no sería ético realizar en una investigación de este tipo). «Esta área de la estadística nunca se había empleado para estudiar la contaminación atmosférica y la mortalidad», señala Dominici.

Los resultados sugieren que disminuir los niveles permitidos de $PM_{2,5}$ de 12 a 10 $\mu g/m^3$ podría rebajar el riesgo de mortalidad de los mayores hasta en un 7 por ciento, lo que permitiría salvar más de 143.000 vidas en EE.UU. a lo largo de un decenio.

El estudio ha impresionado a otros expertos, como C. Arden Pope III, de la Universidad Brigham Young, y John Bachmann, exdirector adjunto de la Oficina de Calidad del Aire de la EPA. «En términos de magnitud, potencia estadística y complejidad analítica, no se puede hacer mejor», elogia Pope.

Este resultado llega en un momento en que la administración Trump está relajando las regulaciones sobre la contaminación atmosférica. En abril, la EPA propuso mantener sin cambios las normas sobre $PM_{2,5}$, tras lo que la agencia calificó de minuciosos análisis y discusiones con sus asesores científicos. Sin embargo, el director de la EPA, Andrew Wheeler, había disuelto poco antes un comité auxiliar de asesores que suelen aportar sus conocimientos científicos sobre estos asuntos. El conjunto de estudios sobre la contaminación atmosférica es sólido, asegura Bachmann, y «este nuevo trabajo lo completa con una réplica muy contundente» a la propuesta de la EPA.

—Susan Cosier

«Es la primera vez que veo este tipo de conservación», afirma Frances Westall, geóloga y astrobióloga del CNRS en Orléans, que opina en calidad de observadora externa. Afirma que la viabilidad del proceso —en cierto modo, análogo a la conservación de los insectos en el ámbar, resina fósil— abre nuevas posibilidades al descubrimiento de indicios de vida primitiva. «La Tierra primitiva era un ambiente volcánico como el de Indonesia. Y Marte también lo era», aclara.

«Ahora sabemos que cualquier tipo de roca silícea podría albergar fósiles o biomoléculas de ese tipo», afirma Chauviré. Los fósiles opalinos que se formaron en los entornos volcánicos propios de la Tierra o de Marte hace cientos de millones de años podrían contener animalitos subterráneos primitivos que en condiciones normales no se conservarían ni en las rocas sedimentarias ni en el ámbar. «El futuro Parque Jurásico podría residir en el ópalo», añade.

—Carolyn Wilke

COMPORTAMIENTO ANIMAL

Peces toreadores

Burlan a sus depredadores mediante una audaz estratagema

El *guppy* puede ser una mascota humilde, pero en su medio natural adopta una táctica tan sorprendente como ilógica para no ser devorado. Cuando descubre un enemigo al acecho, oscurece los ojos, que viran del plateado al negro intenso, lo que atrae al atacante hacia la cabeza.

En un artículo publicado en junio en *Current Biology*, se describe que este comportamiento tan singular es una maniobra de distracción para burlar a los posibles depredadores.

Robert Heathcote, ecoetólogo de la Universidad de Exeter, explica que concibió esa hipótesis mientras comía una magdalena de arándanos a bordo de un tren. Había visto en vídeos filmados a cámara lenta que los peces que cazan emboscados, como los cíclidos lucio (*Crenicichla*), parecían dirigir sus ataques a la cabeza de los *guppies* ojinegros. «El *guppy* aguardaría hasta el último instante y después se daría la vuelta para escabullirse», explica Heathcote, autor principal del estudio.

Con objeto de averiguar cómo responden los cíclidos lucio a los *guppies* de ojos negros y plateados, Heathcote probó primero con lentes de contacto coloreadas, vídeos reproducidos desde una tableta e incluso intentó tatuar el ojo de un pez muerto (aunque la aguja no logró perforar la superficie del globo ocular, sorprendentemente dura).

Heathcote y sus colaboradores acabaron construyendo *guppies* robóticos, tirados por un sedal, para someter a prueba sus hipótesis. Mientras que ante los señuelos de ojos negros los cíclidos se abalanzaban sobre la cabeza, ante los de ojos plateados, lo hacían sobre el cuerpo.

En otro experimento con *guppies* vivos protegidos por una barrera transparente se descubrió que estos apartan a un lado la cabeza para esquivar las fauces del agresor con un reflejo innato fulgurante. El ataque de los cíclidos lucio es inercial, por lo que no corrigen la trayectoria una vez desatado, así que los investigadores pueden «simular» si un *guppy* habría logrado escapar de no haber una barrera.

Los *guppies* grandes, en general menos ágiles y presas más propicias, son los más beneficiados por esta finta. «Engañan al atacante sobre la dirección que van a tomar», afirma el autor Darren Croft, también en Exeter. «Al hacerlo, giran la cabeza en sentido opuesto y huyen.»

Los *guppies* no son las únicas presas que recurren a esa artimaña. Otros peces también alteran el color del globo ocular, y especies tan diferentes como la pintarroja ocelada (*Hemiscyllium ocellatum*) o la paloma bravía poseen en el dorso colores para atraer la atención sobre ellos.

«El presente estudio abre un nuevo campo de investigación que podría explicar casos en que los ojos o los ocelos son muy conspicuos», asegura Karin Kjernsmo, ecoetóloga y ecóloga evolutiva de la Universidad de Bristol, que no ha participado en el estudio. «Tal vez acompañados de una estrategia evasiva, tales resultados explicarían por qué es así.»

En un mundo donde se devora o se es devorado, siempre hay más de lo que parece.

—Richard Sima



Los *guppies* oscurecen los ojos para engañar a los atacantes.

ZOONAR GMBH/ALAMY

AGENDA

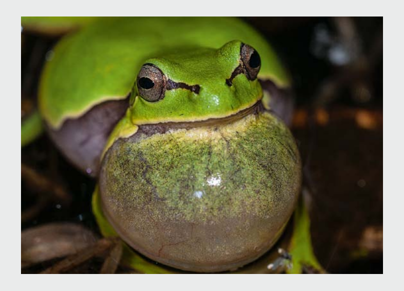
CONFERENCIAS

Del 7 al 28 de octubre - Ciclo
Vacunas: Inmunización, historia y vidas salvadas
Charlas impartidas por expertos en el campo
CosmoCaixa
Barcelona
cosmocaixa.es

14 de octubre – Conferencia virtual
Búsqueda y caracterización de planetas similares a la Tierra
Enric Pallé, Instituto de Astrofísica de Canarias
Agrupación Astronómica Sabadell
astrosabadell.org

EXPOSICIONES

Anfibios españoles: Los más amenazados de nuestra fauna
Museo Nacional de Ciencias Naturales
Madrid
www.mncn.csic.es



Papiromates
Sede de Afundación
Lugo
www.afundacion.org

OTROS

6 y 7 de octubre – Congreso virtual
I Congreso de Comunicación del Cambio Climático
Organiza: Universidad Complutense de Madrid
eventos.ucm.es/46357

Hasta el 23 de octubre
Ciencia en 60 segundos
Concurso de vídeos para menores de 35 años
Convoca: World Congress of Science and Factual Producers
www.wcsfp.com

Hasta el 30 de octubre
Concurso de vídeos de ciencia y tecnología
Para estudiantes de ESO y Bachillerato del País Vasco
Convoca: Elhuyar
zientzia-azoka.elhuyar.eus



Corales del Mar Rojo.

ECOLOGÍA

Nueva prueba de estrés para el coral

La tolerancia aguda al calor ayudaría a reconocer los arrecifes resilientes

El aumento de la temperatura de los océanos amenaza a los arrecifes coralinos del planeta, por lo que saber qué colonias de coral son más resistentes al calor reviste suma importancia de cara a la conservación. Los métodos ordinarios de estudio en este sentido exigen el traslado en avión de las muestras a laboratorios remotos y la exposición a temperaturas altas por espacio de semanas. Ahora, una nueva prueba de estrés térmico lleva el laboratorio hasta el mismo arrecife, donde en un solo día ya se obtienen resultados.

El Sistema Automático para el Estudio del Blanqueamiento del Coral (CBASS, por sus siglas en inglés) ha sido fabricado con materiales adquiribles en una ferretería y consta de cuatro tanques de 10 litros que se pueden llevar a bordo de las mismas embarcaciones en que los investigadores acceden a los arrecifes. «Es sencillo: te lanzas al agua, recoges los corales, los introduces en los tanques y ya puede comenzar el proceso», explica Carol Buitrago López, estudiante de posgrado en la Universidad King Abdullah de Ciencia y Tecnología (KAUST), en Arabia Saudí. Ella y sus colaboradores describieron el CBASS en *Global Change Biology* el agosto pasado.

El equipo introdujo en los tanques del CBASS muestras de coral del tamaño de un dedo, procedentes de dos puntos del Mar Rojo, a una temperatura inicial de 30 °C. Durante tres horas, el sistema calentó el agua de cada tanque hasta temperaturas distintas, con un máximo de 39 °C, que mantuvieron durante tres horas, rebajándola hasta 30 °C en la hora siguiente. Por último, dejaron pasar 11 horas más para que los corales se recuperasen del estrés. Usaron un aparato similar a un flash fotográfico para medir la eficacia con que las microalgas del coral utilizaban la luz en el curso de la fotosíntesis (un indicador fiable del grado de estrés en las algas y las plantas). Esta medición a corto plazo concordó con los resultados de un experimento clásico de estrés térmico prolongado, lo cual demuestra las posibilidades del método para identificar con rapidez los corales resilientes.

«Me encantaría utilizarlo [el CBASS] en mi investigación», confiesa Mikhail Matz, especialista en genética de los corales de la Universidad de Texas en Austin, ajeno al estudio. «La simplicidad de todo el proceso es muy interesante.» Aunque los arrecifes coralinos son demasiado vastos para analizarlos en su totalidad, la velocidad del CBASS permitiría evaluar muestras escogidas de coral a una escala que hasta ahora era imposible. Christian Voolstra, investigador de la KAUST y la Universidad de Constanza, y autor principal del nuevo artículo, explica que en un experimento de continuación «analizamos 500 corales en dos semanas. Antes habría tenido que dedicar toda mi vida profesional a ello».

Otra cuestión pendiente es si los corales que responden mejor en los experimentos del CBASS podrán resistir realmente el cambio climático, advierte Matz. Aun así, asegura que el procedimiento estandarizado permitirá comparar directamente la tolerancia al calor de las colonias coralinas de diversas regiones del globo, un paso clave en los esfuerzos de restauración. Los especialistas en conservación cultivan pedazos de coral en criaderos, que después trasladan a los arrecifes degradados, pero hasta la fecha los proyectos de trasplante no han alcanzado las expectativas esperadas. Voolstra espera que el trasplante de los corales más termotolerantes ayudará a ganar tiempo hasta que el cambio climático pueda ser controlado.

—Scott Hershberger

REINHARD DIRSCHERL, GETTY IMAGES *(coral)*; P. HERNÁNDEZ *(rana)*

PALEONTOLOGÍA

Pistas prehistóricas del lince ibérico

El estudio de señales y fósiles arroja luz sobre el comportamiento del felino hace 30.000 años

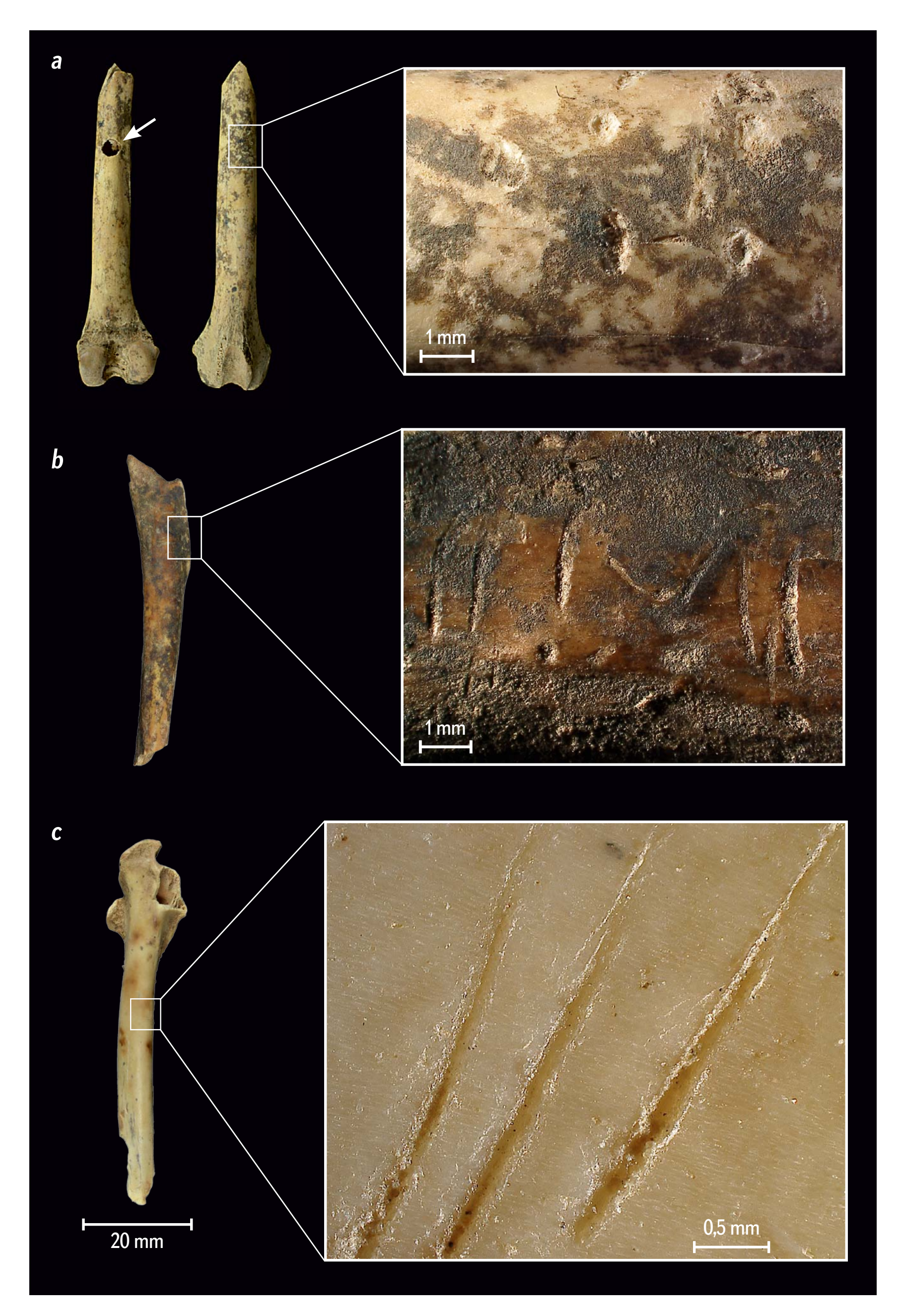
ANTONIO RODRÍGUEZ-HIDALGO

El lince ibérico (*Lynx pardinus*) estuvo a punto de extinguirse a principios del siglo XXI. Entre Doñana y Sierra Morena, en Andalucía, se contaban menos de 200 ejemplares. Sin embargo, durante el último medio millón de años el lince fue uno de los carnívoros más abundantes en toda Iberia. Sus restos fósiles se han encontrado por centenares en decenas de yacimientos, especialmente en grutas y cuevas de origen calizo. Nuestras últimas investigaciones, publicadas en *Scientific Reports*, arrojan luz sobre el comportamiento pasado de uno de los mamíferos más emblemáticos de los ecosistemas ibéricos y nos permiten entender por qué conservamos tantos restos de ellos.

Enigmas zooarqueológicos

Los ecosistemas del Pleistoceno ibérico han llegado hasta nosotros a través del registro fósil. Este mundo perdido se configuró al compás de ciclos glaciares (fríos) e interglaciares (cálidos), los cuales se sucedieron en una letanía de más de dos millones de años. Hace unos seiscientos mil, el clima se volvió más frío y los ecosistemas menos diversos. De esta época, denominada Pleistoceno tardío, datan las faunas más populares de la Edad de Hielo. Osos, hienas y leones de las cavernas (*Ursus spelaeus*, *Panthera spelaea* y *Crocuta spelaea*) atraen nuestra atención. Sin embargo, el lince ibérico (*Lynx pardinus*) fue mucho más común: sus restos fósiles aparecen tanto en el arco mediterráneo como en la meseta y la fachada atlántica, aunque su distribución se extendió más allá de los Pirineos, hasta la costa de Liguria.

A menudo, los fósiles de lince ibérico aparecen asociados a grandes cantidades de restos fósiles de conejo, la presa favorita del felino. No obstante, esta asociación típica del registro paleontológico ibérico no tenía hasta ahora una explicación clara. La razón es que en esta región el conejo de monte (*Oryctolagus cuniculus*)



EN LOS FÓSILES DE CONEJO hallados en el yacimiento de la Cova del Gegant, en Sitges, se observan mordeduras inequívocas de los linces (*a* y *b*), pero también señales de corte realizadas por humanos (*c*). Estos hallazgos indican que ambos tuvieron como presa el conejo en la cueva en distintos momentos.

ANTONIO RODRÍGUEZ-HIDALGO

también constituyó una presa esencial para la subsistencia de los humanos del Paleolítico superior y el Mesolítico.

Durante décadas, los zooarqueólogos han tratado de descifrar la naturaleza de las acumulaciones masivas de restos de conejos en los yacimientos pleistocenos. De hecho, para algunos investigadores el consumo humano de pequeñas presas, especialmente lepóridos pero también aves, era más común de lo que se pensaba. Como demostraron Eugene Morin, de la Universidad de Trent, en Ontario, y sus colaboradores en un artículo publicado en *Science Advances* en 2019, homínidos arcaicos como los neandertales y preneandertales pudieron tener dietas más amplias en el noroeste del Mediterráneo que en otras partes de Europa, en las que se consumía sobre todo animales de gran tamaño, como bisontes, cérvidos y otros ungulados.

Pero, además de los humanos, numerosos depredadores ibéricos, como el águila imperial y el búho real, basaban su alimentación en el conejo, lo que genera un amplio abanico de probables agentes modificadores y acumuladores de sus restos.

La tafonomía arqueológica, o zooarqueología, es la disciplina que trata de desentrañar la génesis de los fósiles, desde el momento en que forman parte de organismos vivos hasta que los especialistas los recuperan en las excavaciones y las prospecciones arqueo-paleontológicas. Los zooarqueólogos adoptan a veces un enfoque actualista: utilizan modelos generados por carnívoros vivos como marco de referencia para deducir comportamientos anteriores. Examinan cuáles son sus principales presas actuales, cómo rompen sus huesos, cómo son las marcas dejadas por sus dientes o cómo descartan y acumulan los huesos de sus víctimas una vez consumidos.

Para identificar la señal tafonómica del lince ibérico en los huesos de sus presas, nuestro grupo ha realizado durante años experimentos en colaboración con los científicos de la Estación Biológica de Doñana, quienes intentan recuperar la especie mediante el exitoso Programa de Conservación Ex-situ del Lince Ibérico. Bajo la premisa actualista del presente como clave para interpretar el pasado, recogimos los restos de conejos y perdices con que se alimenta a los linces en los centros de cría en cautividad de El Acebuche y Granadilla, y estudiamos las señales y las fracturas que realizaban en los huesos.

El análisis de más de 10.000 restos modificados por linces adultos y crías actuales nos permitió publicar varios estudios entre 2013 y 2016. En ellos construimos un marco de referencia experimental con el que comparar las señales y modificaciones que encontramos sobre los huesos en los conjuntos fósiles peninsulares. Por suerte, una pequeña legión de zooarqueólogos ha realizado trabajos similares con otros depredadores que, como el lince, tienen al conejo como base de su alimentación. Así, autores como Lluís Lloveras, del Departamento de Prehistoria, Historia Antigua y Arqueología de la Universidad de Barcelona, y sus colaboradores han generado datos cruciales sobre el búho real, el águila imperial, el zorro, el lobo o los propios humanos.

Una antigua guarida

En nuestro artículo de *Scientific Reports* hemos aplicado los marcos de referencia tafonómica al estudio de los restos fósiles de la Cova del Gegant, un importante yacimiento en una cueva semisumergida de Sitges, en la costa catalana. El yacimiento, conocido por albergar restos de varios neandertales, ha sido excavado desde el 2007 bajo la dirección de Montserrat Sanz y Joan Daura, del Seminario de Estudios e Investigaciones Prehistóricas de la Universidad de Barcelona, ambos coautores del reciente estudio.

El conjunto fósil que analizamos en esta ocasión cuenta con más de 3500 restos de 30.000 años de antigüedad asociados a un nivel arqueológico en el que también se hallaron restos de varias fogatas y huesos quemados. Los fósiles de linces de diferente edad son muy abundantes y están muy bien conservados, incluidos los de algunos cachorros que murieron poco después del nacimiento. Junto con todos ellos, abundan los restos de sus presas, especialmente conejos y algunas aves, como palomas, perdices y córvidos, según ha identificado Antonio Sánchez-Marcos, del Instituto Catalán de Paleontología Miquel Crusafont.

Nuestros resultados indican que los linces ibéricos vivieron en la cueva del Gegant, y lo hicieron principalmente durante la temporada de cría, que en la actualidad transcurre entre inicios de marzo y finales de junio. Las hembras parieron allí hace treinta milenios y ocultaron a los cachorros, como lo hacen hoy, al menos durante 12 semanas. También transportaron carcasas de presas para alimentar a las crías. De la observación de los linces actuales, sabemos que las hembras presentan presas a sus cachorros incluso antes de que comiencen a ingerir carne, unos veinte o treinta días después de su nacimiento. Un mes después de este, se ven obligadas a transportar al cubil entre uno y tres conejos diarios. Las crías devoran gran parte de las presas, generando pequeñas mordeduras y fracturas sobre los huesos. Los cachorros que habitaron la cueva royeron los huesos y produjeron un conjunto de señales sobre su superficie similar al que observamos en nuestros trabajos experimentales en Doñana.

Los linces también defecaron en la guarida, según se desprende de los coprolitos (excrementos fósiles) que hemos desenterrado, en los que se observan huesos de conejo digeridos. De vez en cuando, algunas crías, y también algún adulto, morían dentro de la cueva, y sus fósiles se acumularon junto con los de sus presas.

El conjunto de señales y fósiles que fueron enterrados juntos se conoce como tafocenosis. En nuestro artículo hemos caracterizado por primera vez la tafocenosis del lince ibérico. Este avance es importante para la arqueología y la paleontología, ya que nos permite diferenciar las sobras de la comida del lince ibérico de las de los humanos prehistóricos, incluidos los neandertales.

Los linces tuvieron que usar la cueva del Gegant como paridera y guardería de forma recurrente, probablemente durante generaciones. De lo contrario, no hallaríamos estas características tafonómicas tan claras. Si consideramos las observaciones de Néstor Fernández y Francisco Palomares, de la Estación Biológica de Doñana, sobre el comportamiento actual del lince en esa zona, este prefiere criar y utilizar como cubil los troncos de los árboles grandes, debido a su seguridad y estabilidad ambiental. Pero en Doñana no hay cuevas, que suponen un refugio aún más sólido. Nuestros resultados sobre la conducta pasada del felino en las cuevas quizá puedan tenerse en cuenta a la hora de reintroducirlo en nuevos territorios.

Ocupación sucesiva de linces y humanos

La singularidad del conjunto de la Cova del Gegant se debe a que los restos se acumularon en una sola capa arqueológica y, además, no fueron modificados sustancialmente por ningún otro carnívoro. Ello nos ha permitido definir una serie de criterios y características que pueden ser-

vir para identificar otros cubiles de lince fósil, lo que representa una herramienta valiosa para futuros estudios arqueológicos y paleontológicos.

Estas características son: la abundancia de restos de conejos; la presencia complementaria de restos de aves; numerosos fósiles óseos de linces de diferentes edades; una fracturación peculiar de los huesos largos de los conejos, con una preservación mayor de las partes más distales de manos y patas; y unas marcas de mordeduras de lince en los huesos de sus presas, especialmente las de pequeño tamaño, que indican el consumo por parte de las crías. A estos criterios se une la abundancia de coprolitos que contienen huesos digeridos.

Los humanos ocuparon la cueva de forma efímera en los momentos en que los linces no lo hicieron. Allí encendieron hogueras y el fuego calcinó algunos de los restos de conejo y lince que estaban esparcidos en la superficie.

Este estudio abre nuevas perspectivas sobre el conocimiento de los linces ibéricos. En primer lugar, porque su abundancia en otros yacimientos ibéricos puede ser el resultado del uso generalizado de las cuevas como cubiles de cría. En segundo lugar, porque los numerosos restos de conejos y aves en determinados yacimientos podrían ser también consecuencia de la actividad de los linces y no de otros agentes que hasta ahora se habían propuesto, como los humanos prehistóricos.

El verano pasado, el paleogenetista británico Ross Barnett publicó *The missing lynx: The past and future of Britain's lost mammals* («La desaparición del lince: Pasado y futuro de los mamíferos extinguidos de la Gran Bretaña»). A través de los fósiles de grandes mamíferos, Barnett nos muestra cuán diferente era Europa hace 15.000 años. El libro también nos enseña cómo el estudio de los fósiles de la Edad de Hielo puede ayudarnos a rescatar especies en peligro de extinción y a conservar la biodiversidad. Nuestro trabajo también podría tener esta lectura. El registro fósil puede contribuir a recuperar el lince ibérico, al proporcionar pruebas de sus hábitos y comportamientos hace 30.000 años, cuando la presión humana era mucho menor y el lince cazaba sin preocupación en los bosques mediterráneos de toda Iberia.

Antonio Rodríguez-Hidalgo
es investigador del Departamento de Prehistoria, Historia Antigua y Arqueología de la Universidad Complutense de Madrid.

PARA SABER MÁS

The selection of breeding dens by the endangered Iberian lynx (*Lynx pardinus*): Implications for its conservation. Néstor Fernández y Francisco Palomares en *Biological Conservation*, vol. 94, n.º 1, págs. 51-61 , junio de 2000.

Taphonomic study of leporid remains accumulated by the Spanish imperial eagle (*Aquila adalberti*). Lluís Lloveras, Marta Moreno-García y Jordi Nadal en *Geobios*, vol. 41, págs. 91-100, enero-febrero de 2008.

Taphonomic criteria for identifying Iberian lynx dens in quaternary deposits. Antonio Rodríguez-Hidalgo et al. en *Scientific Reports*, vol. 10, art. 7225, abril de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Lince ibérico. Genética y distribución. Francisco Palomares en *IyC*, agosto de 2004.

Aplicación de la genética a la conservación del lince ibérico. Elena Marmesat, María Lucena-Pérez y José A. Godoy en *IyC*, abril de 2018.

MATERIALES

Nuevos estados en el grafeno «mágico»

Dos trabajos descubren propiedades electrónicas hasta ahora desconocidas en el grafeno. El hallazgo augura todo tipo de avances tecnológicos y podría ayudar a entender la superconductividad de altas temperaturas

DMITRI K. EFETOV

El descubrimiento de nuevos materiales ha encendido revoluciones tecnológicas desde la Edad de Piedra. Hoy en día, tal vez los materiales que mejor definen nuestro mundo sean los empleados para fabricar los componentes básicos de nuestra tecnología: semiconductores, imanes o superconductores, los cuales se hallan en el corazón de transistores, dispositivos de memoria y todo tipo de equipamiento científico y técnico.

Un sueño de la ciencia moderna es disponer de materiales capaces de exhibir distintas propiedades al mismo tiempo. La idea que se persigue con ello es poder activar o desactivar las propiedades elegidas para, según la necesidad, poder convertirlos en un imán o en un superconductor sin más que presionar un botón. Si bien semejante objetivo ha sido una fantasía durante muchos años, dos trabajos recientes de nuestro equipo de investigación han demostrado que algo así es posible.

El material en el que se han centrado nuestras investigaciones ha sido el grafeno, el cual se compone de capas de carbono de un solo átomo de espesor. Y la manera de modificar sus propiedades ha resultado ser tan inesperada como simple: superponer dos láminas y girarlas ligeramente una con respecto a la otra. Los resultados revisten gran interés tanto teórico como práctico, y cabe esperar que en un futuro cercano puedan generalizarse a otros materiales bidimensionales. Aparte de ayudar a conocer mejor las ricas propiedades electrónicas del grafeno, el hallazgo encierra el potencial de revolucionar todo tipo de aplicaciones tecnológicas.

Superconductividad oculta

En líneas generales, las propiedades de un material dependen de las especies atómicas que lo componen y de cómo se disponen sus átomos en la red cristalina. Ello da lugar a distintas estructuras periódicas y simetrías, las cuales determinan las propiedades electrónicas de la muestra y hacen que se comporte como un semiconductor, un imán o un superconductor, entre otras posibilidades.

Con el objetivo de hallar nuevos comportamientos electrónicos, durante las últimas décadas los científicos se han concentrado en sintetizar cristales cada vez más complejos. Por ejemplo, combinar un

número creciente de especies atómicas en una misma muestra ha permitido obtener todo tipo de materiales exóticos que no se dan en la naturaleza. Al mismo tiempo, para emplear esos materiales en la electrónica moderna, los investigadores han tratado de reducir sus dimensiones hasta escalas nanométricas. Dicha miniaturización también aumenta la sensibilidad de los materiales a los campos eléctricos y magnéticos, lo que permite que estos alteren sus propiedades.

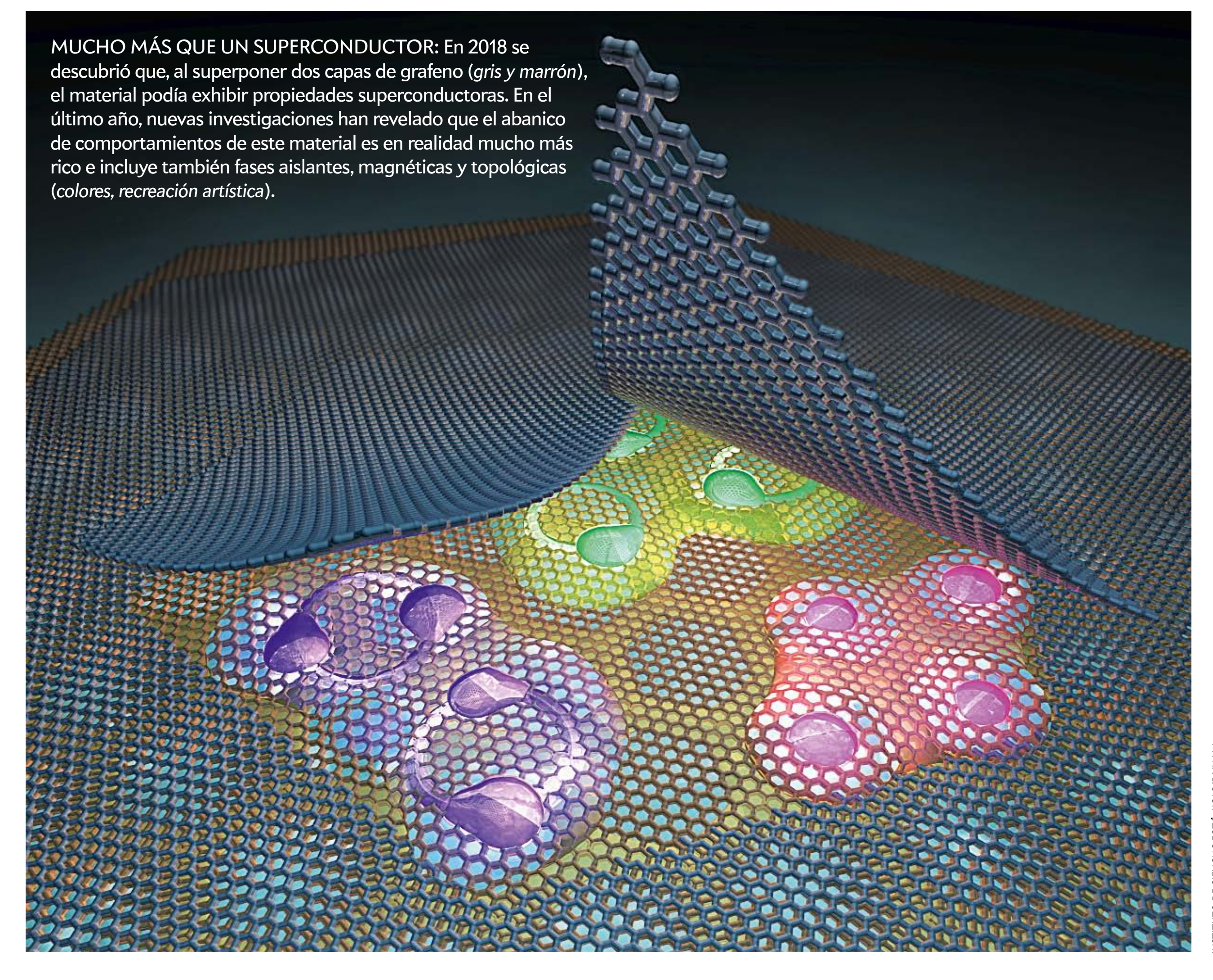
En este contexto, el grafeno, compuesto por átomos de carbono dispuestos en una red hexagonal bidimensional, constituye una gran anomalía. Al ser el material más simple y delgado posible, su hallazgo en 2004 proporcionó un firme candidato para revolucionar la electrónica. Por un lado, es un excelente conductor de la electricidad, en el que la corriente puede controlarse fácilmente mediante la aplicación de un campo eléctrico. Sin embargo, y debido precisamente a su simplicidad, una sola capa de este material carece de fases electrónicas más complejas, como las que exhiben los materiales magnéticos o superconductores.

No obstante, hace algo más de dos años un hallazgo revolucionario cambió drásticamente este panorama. Un equipo liderado por el físico Pablo Jarillo-Herrero, del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), descubrió que superponer dos capas de grafeno permitía alterar sus propiedades. Hasta entonces, todos los intentos previos habían indicado que dos láminas de grafeno superpuestas se comportaban casi del mismo modo que una sola. No obstante, y siguiendo una predicción formulada en 2011 por el físico Allan MacDonald, de la Universidad de Texas en Austin, el equipo de Jarillo-Herrero comprobó que las propiedades del grafeno podían cambiar radicalmente si las capas se giraban una con respecto a otra un ángulo de exactamente 1,1 grados, un valor que desde entonces se conoce con el nombre de «ángulo mágico». En tal caso, al enfriar la muestra a temperaturas cercanas al cero absoluto, los investigadores comprobaron que el grafeno bicapa se tornaba superconductor.

Muestras sin irregularidades

En un trabajo cuyos resultados se publicaron a finales del año pasado en *Nature*, nuestro grupo encontró que el abanico de propiedades del grafeno bicapa con ángulo mágico era, en realidad, mucho más amplio. La razón por la que hasta entonces tales propiedades habían pasado inadvertidas se debía a las dificultades que entrañaba el proceso de fabricación de las muestras.

Para entender por qué, podemos imaginar el grafeno como una lámina de plástico transparente similar a las que empleamos en la cocina para envolver los alimentos. Al manipularlas, todos sabemos lo fácil que resulta inducir en ellas pliegues y dobleces. Por tanto, podemos



MUCHO MÁS QUE UN SUPERCONDUCTOR: En 2018 se descubrió que, al superponer dos capas de grafeno (*gris y marrón*), el material podía exhibir propiedades superconductoras. En el último año, nuevas investigaciones han revelado que el abanico de comportamientos de este material es en realidad mucho más rico e incluye también fases aislantes, magnéticas y topológicas (*colores, recreación artística*).

INSTITUTO DE CIENCIAS FOTÓNICAS/F. VIALLA

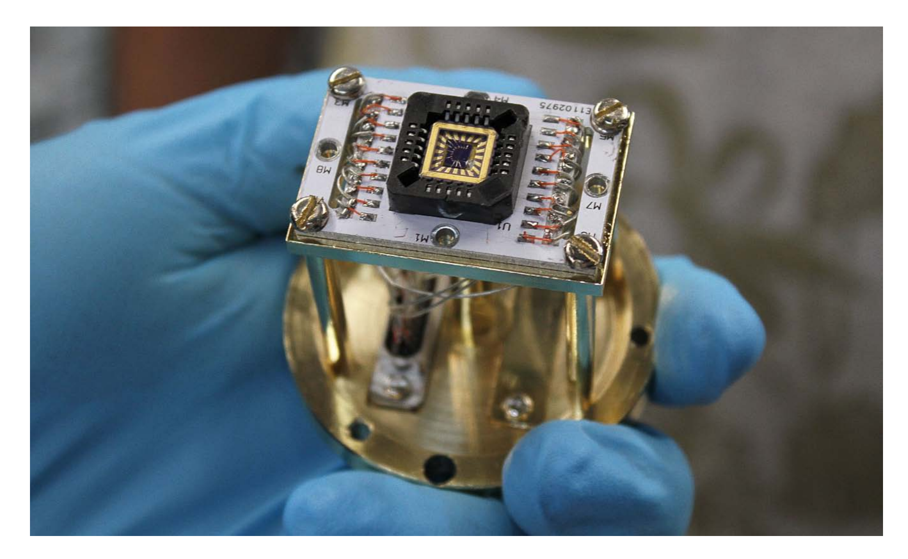
hacernos una idea de lo complicado que sería superponer dos de tales láminas a la perfección, sin que entre ellas quedaran atrapadas burbujas de aire ni apareciesen pliegues de ningún tipo.

Tales dificultades son similares a las que aparecen al manipular el grafeno bicapa. Para sortearlas, nuestro grupo ideó un ingenioso método de fabricación que podemos visualizar como el «planchado» de las capas, lo que permite superponerlas sin generar imperfecciones. Al hacerlo, observamos que era posible inducir varios estados superconductores distintos entre sí mediante la aplicación de un pequeño campo eléctrico. Y también que, al someter el material a un pequeño campo magnético, la muestra podía comportarse como un imán que, a su vez, daba lugar a varias fases topológicas, en las que la corriente eléctrica fluye por los bordes de la muestra sin dispersarse.

Con todo, tal vez lo más sorprendente fuera comprobar que los distintos estados electrónicos podían «sintonizarse» a voluntad sin más que aplicar un voltaje a un condensador cercano. Dicho proceso modifica la densidad de carga presente en el grafeno y funciona como un interruptor que activa y desactiva cada una de las fases, lo que permite una conversión controlada de un estado aislante a uno superconductor, magnético o topológico. De esta manera, el grafeno nos permitía llevar a la práctica un objetivo que había estado durante años en la vanguardia de la investigación sobre materiales.

Por otro lado, numerosos investigadores albergan la esperanza de que el estudio de la superconductividad en el grafeno bicapa permita desentrañar los secretos de la superconductividad a altas temperaturas, un ambicioso objetivo que la ciencia de materiales viene persiguiendo desde hace décadas. A tal fin, un aspecto esencial pasa por entender con detalle la relación entre los estados aislante y superconductor del grafeno.

En un trabajo publicado este verano en *Nature*, nuestro grupo ha dado un paso importante en esa dirección. Al considerar capas de grafeno giradas entre sí un ángulo cercano pero no idéntico al ángulo mágico, hemos demostrado que es posible regular la velocidad y la interacción mutua de los electrones. Gracias a ello, hemos podido controlar con un detalle sin precedentes el paso de la fase aislante a la superconductora. Por analogía con lo que ocurre en otros materiales, hasta ahora se pensaba que ambas fases, aunque muy distintas entre sí, tenían un origen electrónico común. Nuestro trabajo, sin embargo, parece sugerir que son independientes y que, en realidad, compiten una contra la otra.



PROPIEDADES REGULABLES: El descubrimiento de nuevos estados en el grafeno bicapa ha sido posible gracias a un método de fabricación que impide la aparición de irregularidades microscópicas entre las capas. Esta imagen muestra el dispositivo que permite activarlas y desactivarlas a voluntad; las capas de grafeno se encuentran depositadas en la zona cuadrada y oscura que se observa en el centro del instrumento.

Una nueva disciplina

Esta enorme versatilidad del grafeno bicapa resulta muy prometedora, ya que demuestra que es posible manipular a voluntad las propiedades de los materiales bidimensionales sin más que girarlos un determinado ángulo. De hecho, se ha visto que el mismo principio puede funcionar no solo para el grafeno, sino también para otros miles de materiales bidimensionales conocidos. Ello ha dado lugar al nacimiento de un nuevo campo de investigación, apodado «girotrónica» (*twistronics*).

Todos estos hallazgos abren la puerta a numerosos avances tecnológicos. Por ejemplo, hemos visto que la cantidad de electrones que se necesitan para recrear el estado superconductor en el grafeno bicapa es baja. Eso provoca que el material se torne muy sensible a la radiación, ya que un solo fotón puede calentar el estado superconductor y destruirlo. Entre otras ventajas, esta propiedad podría resultar útil en la fabricación de ordenadores cuánticos.

Por último, la posibilidad de cambiar a voluntad las propiedades de un material abre la puerta a revolucionar el ahorro de energía de nuestros dispositivos. Cabe esperar que, en el futuro, estos materiales se abran a nuevas funciones y sean cada vez más fáciles de controlar y miniaturizar.

Dmitri K. Efetov *investiga en el Instituto de Ciencias Fotónicas de Barcelona, donde dirige el grupo de materiales cuánticos de baja dimensionalidad.*

PARA SABER MÁS

Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices. Yuan Cao et al. en *Nature*, vol. 556, págs. 43-50, marzo de 2018.

Superconductors, orbital magnets, and correlated states in magic angle bilayer graphene. Xiaobo Lu et al. en *Nature*, vol. 574, págs. 653-657, octubre de 2019.

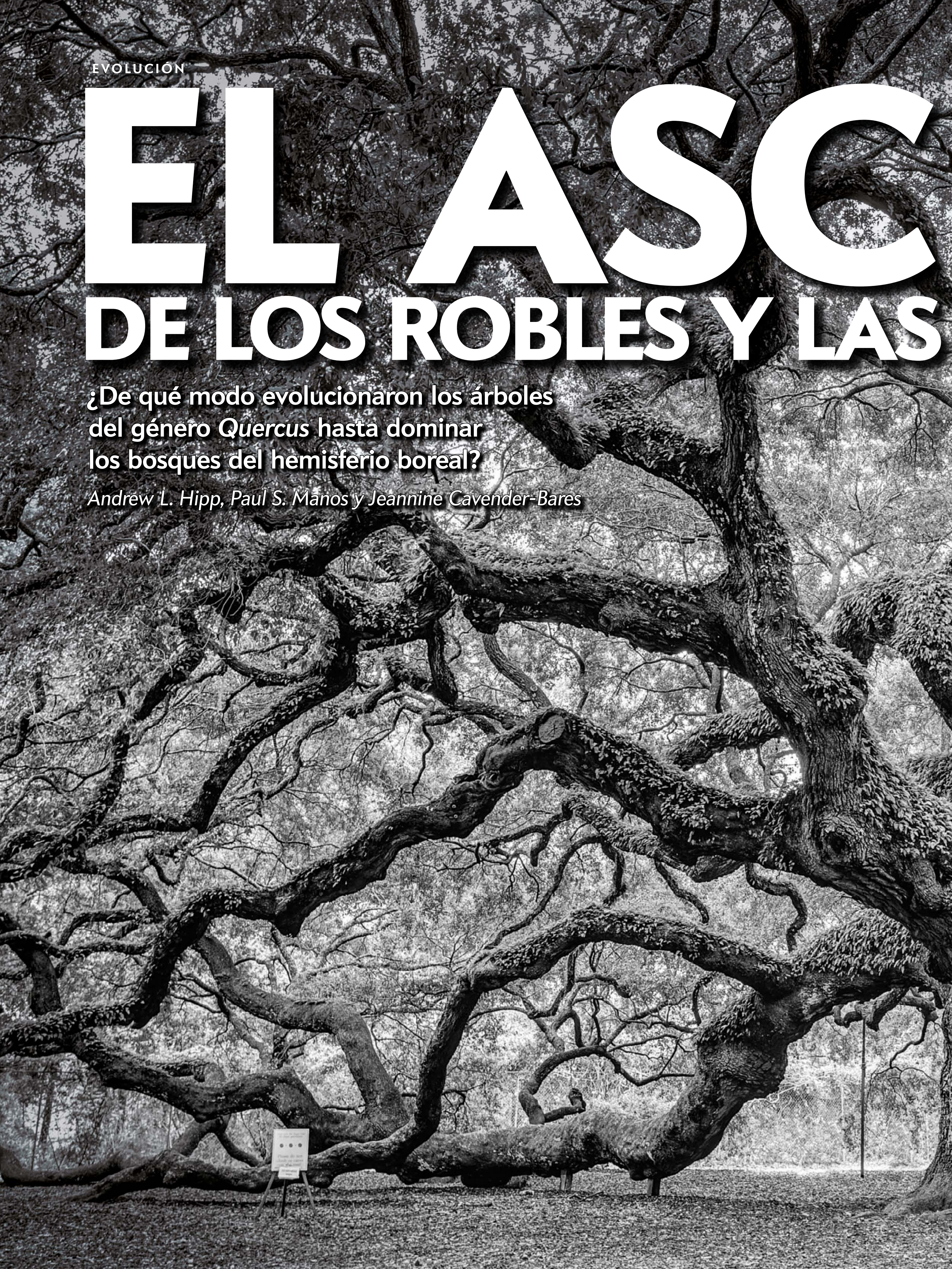
Untying the insulating and superconducting orders in magic-angle graphene. Peter Stepanov et al. en *Nature*, vol. 583, págs. 375-378, julio de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Electrónica del grafeno. José González Carmona, M.ª Ángeles Hernández Vozmediano y Francisco Guinea en *IyC*, septiembre de 2010.

Viaje a un universo de dos dimensiones. José J. Valdoví y Ángel Rubio en *IyC*, septiembre de 2018.

Superconductividad en el grafeno. Elizabeth Gibney en *IyC*, mayo de 2019.



EL ASC

DE LOS ROBLES Y LAS

¿De qué modo evolucionaron los árboles del género *Quercus* hasta dominar los bosques del hemisferio boreal?

Andrew L. Hipp, Paul S. Manos y Jeannine Cavender-Bares



ENSO ENCINAS

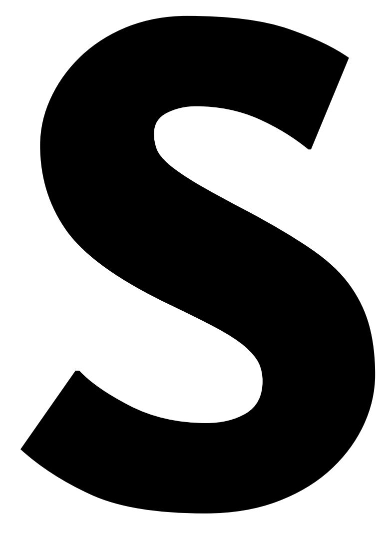
ANGEL, un ejemplar monumental de encina del sur (*Quercus virginiana*) ubicado en Johns Island, Carolina del Sur, tiene de 400 a 500 años de edad.

Andrew L. Hipp es director del herbario del Arboreto Morton, en Lisle, Illinois. Sus investigaciones versan sobre la evolución, el mantenimiento y las implicaciones de la fitodiversidad, con hincapié en la filogenómica del género *Quercus*.

Paul S. Manos ejerce como profesor en la Universidad Duke. Estudia la sistemática y la biogeografía de las plantas angiospermas, con especial interés en la evolución de las especies de *Quercus*, carias y nogales.

Jeannine Cavender-Bares es profesora en la Universidad de Minnesota. Estudia el origen, la fisiología y la organización de la biodiversidad vegetal y sus consecuencias, con énfasis en el género *Quercus*.





Si fuésemos a parar a cualquier rincón de Norteamérica hace 56 millones de años, es probable que no reconociésemos el lugar. En los albores del Eoceno, la Tierra era más cálida y húmeda que en la actualidad. Un mar acababa de quedar encerrado en mitad de las Grandes Llanuras y las Montañas Rocosas no habían alcanzado toda su altura. Las comunidades animales y vegetales del continente eran radicalmente distintas. En el Ártico canadiense, cuya tundra acoge hoy una escasa variedad vegetal, las temperaturas permanecían todo el año por encima del punto de congelación y sustentaban una flora abundante y diversa; la isla de Ellesmere, en el remoto norte de Canadá, frente al extremo noroccidental de Groenlandia, era el hogar de caimanes y de tortugas terrestres gigantes. Lo que hoy es el sudeste de Estados Unidos estaba cubierto de selvas tropicales habitadas por primates. Y en el noreste de ese país crecían bosques de árboles de hoja plana (latifolios) y perenne, o bien bosques de caducifolios como ginkgos, durillos (*Viburnum*), abedules y olmos, entre otras especies. Los bosques de latifolios caducos que, desde el norte de México, hoy cubren el 11 por ciento de Norteamérica estaban en su infancia. Pero todo estaba a punto de cambiar a raíz de la dispersión y la extraordinaria diversificación de las que acabarían conformando uno de los géneros de plantas leñosas de mayor importancia ecológica y económica del planeta: los árboles anemófilos y glandíferos del género *Quercus*, que vulgarmente llamamos robles o encinas.

Durante el transcurso de 56 millones de años, los representantes de este género evolucionaron a partir de una única población indiferenciada hasta convertirse en las aproximadamente 435 especies que pueblan hoy los cinco continentes, desde Canadá hasta Colombia y desde Noruega hasta Borneo. Son especies clave y sostienen el funcionamiento de los bosques que conforman en el hemisferio boreal. Fomentan la biodiversidad en las distintas ramas del árbol de la vida, desde los hongos a las avispas, las aves o los mamíferos. Además, depuran el aire, secuestran el dióxido de carbono y absorben los contaminantes atmosféricos. Y han modelado la cultura humana, al ofrecernos alimento con sus bellotas y madera para construir nuestras casas, muebles y barcos. Han resultado ser árboles tan valiosos para la humanidad que los hemos inmortalizado en leyendas y mitos desde hace siglos.

Los robles y las encinas son especialmente prominentes en el continente americano. Cerca del 60 por ciento de sus especies habitan en él. Esta asombrosa diversidad, sumada al he-

EN SÍNTESIS

Los árboles del género *Quercus* constituyen un grupo de gran diversidad y difusión, con una importancia esencial en los bosques donde habitan.

Los avances en el campo de la genómica han permitido reconstruir la historia evolutiva del género.

Los resultados condicionarán la gestión de los robledales y encinares a fin de asegurar su supervivencia ante el calentamiento del planeta.

PÁGINAS ANTERIORES: DAWNA MOORE, ALAMY

cho de que las especies de esta región representan más biomasa forestal que ningún otro género de plantas leñosas de Norteamérica y México, los convierte en el grupo arbóreo más importante de los bosques del continente. Para conocer en profundidad los bosques (la biodiversidad, las redes tróficas y su aportación al bienestar humano) se necesita saber cómo llegaron a predominar en ellos estos árboles. Décadas atrás solo se podía especular acerca de su historia evolutiva, debido a las lagunas en el registro fósil y las limitaciones de las técnicas biomoleculares con que se deducían los episodios evolutivos a partir del ADN de organismos actuales. Pero los recientes avances en la secuenciación y análisis de los genomas han permitido, a nuestros equipos y a otros, reconstruir un retrato minucioso del origen, la diversificación y la dispersión del género *Quercus*. La historia de estos árboles es un relato de notable éxito evolutivo, que tendrá repercusiones importantes a la hora de predecir su respuesta al cambio climático y elaborar planes de gestión que aseguren su supervivencia.



LAS HOJAS de los robles rojos tienen lóbulos puntiagudos (*1*); las de los robles blancos los tienen redondeados (*2*).

JOHN SEILER, GETTY IMAGES (1); GETTY IMAGES (2)

ROJOS Y BLANCOS

Las diferencias entre los grandes grupos del género saltan a la vista hasta para un observador profano. En el continente americano dominan dos linajes evolutivos que quizás algún lector ya conozca. El grupo de los robles rojos (sección *Lobatae*) lo integran especies dotadas de hojas con lóbulos puntiagudos. En la mayoría de ellos transcurre un año desde que el polen se deposita en la flor femenina y fecunda la semilla hasta que el glande o bellota que constituye el fruto madura, ya en la temporada siguiente. Los miembros del otro gran linaje, el grupo de los robles blancos (sección *Quercus*), poseen hojas con lóbulos redondeados; estas, además, suelen contener más nutrientes que las de los rojos y fertilizan el suelo al caer. Las bellotas de los robles blancos prácticamente maduran sin excepción el mismo año en que la flor es polinizada, llegando en ocasiones a germinar en la misma rama. Las ardillas grises prefieren recolectar las bellotas de los robles rojos para su despensa invernal, pues es menos probable que se hayan echado a perder cuando regresen a por ellas.

Los robles blancos son también capaces de obstruir las células tubulares conductoras de agua que conforman los vasos de su leño (o xilema). Lo hacen mediante tílides, unas estructuras esféricas que cierran los vasos y actúan como barrera contra los mortíferos hongos, como *Bretziella fagacearum*. Los robles rojos son más lentos y no tan contundentes en su defensa. Por esa razón la madera de los blancos se ha venido utilizando durante siglos en la construcción de embarcaciones y de barricas de vino, puesto que los vasos obstruidos retienen mejor el agua. Los insectos fitófagos también saben reconocer las diferencias y la mayoría están adaptados a uno u otro grupo. Incluso los hongos micorrícicos, que conectan las raíces vegetales con los nutrientes del suelo, parecen reconocerlas: algunos prefieren entablar la relación simbiótica con las especies de un linaje y otros con las del otro.

En cambio, cuando descendemos al nivel de especie a menudo resulta difícil distinguir los robles emparentados. La variación intraespecífica, resultado tanto de las respuestas plásticas de los árboles al entorno como de la variación genética entre los individuos, suele ser tan grande como la variación interespecífica. Y los robles habitualmente solo se hibridan con los del mismo grupo, sean blancos o rojos, tónica que se repite en los seis grandes linajes del planeta. Esa gran variabilidad intraespecífica, sumada a la hibridación interespecífica, dificulta la clasificación.

La hibridación, además, complica la reconstrucción de la historia evolutiva con las técnicas convencionales de biología molecular, que solo secuencian uno o varios genes, pues un mismo gen sigue a menudo caminos distintos. Es más, una especie de *Quercus* puede hibridarse con otras muchas, de modo que los genes diferentes relatan aspectos distintos de esa historia a lo largo del área de distribución de la especie en cuestión. El genoma de estos árboles es, pues, un mosaico modelado por la especiación y la hibridación. Las secuencias de uno o de varios genes no revelan por completo la historia de la especiación de robles y encinas.

Hace veinte años, todo lo que se tenía para comenzar era un puñado de genes nucleares y la secuencia del ADN del cloroplasto, el orgánulo de la célula vegetal responsable de la fotosíntesis. Con eso bastaba para discernir las ramificaciones más gruesas del árbol filogenético o familiar de *Quercus*, pero no la disposición de las ramas terminales. En 2008, los tres reparamos en que las nuevas técnicas que ya usábamos para estudiar la hibridación y los límites entre las especies del grupo rojo también nos permitirían inferir la historia evolutiva de estos árboles. Desde entonces, en colaboración con otros especialistas de todo el mundo, hemos hecho uso de una técnica llamada secuenciación asociada a dianas de restricción para leer pequeños segmentos del ADN repartidos por todo el genoma. Analizamos esos datos con métodos estadísticos que reconstruyen el orden en que las especies se han escindido de los ancestros comunes y cuáles

Continúa en la página 22

La marcha de los robles

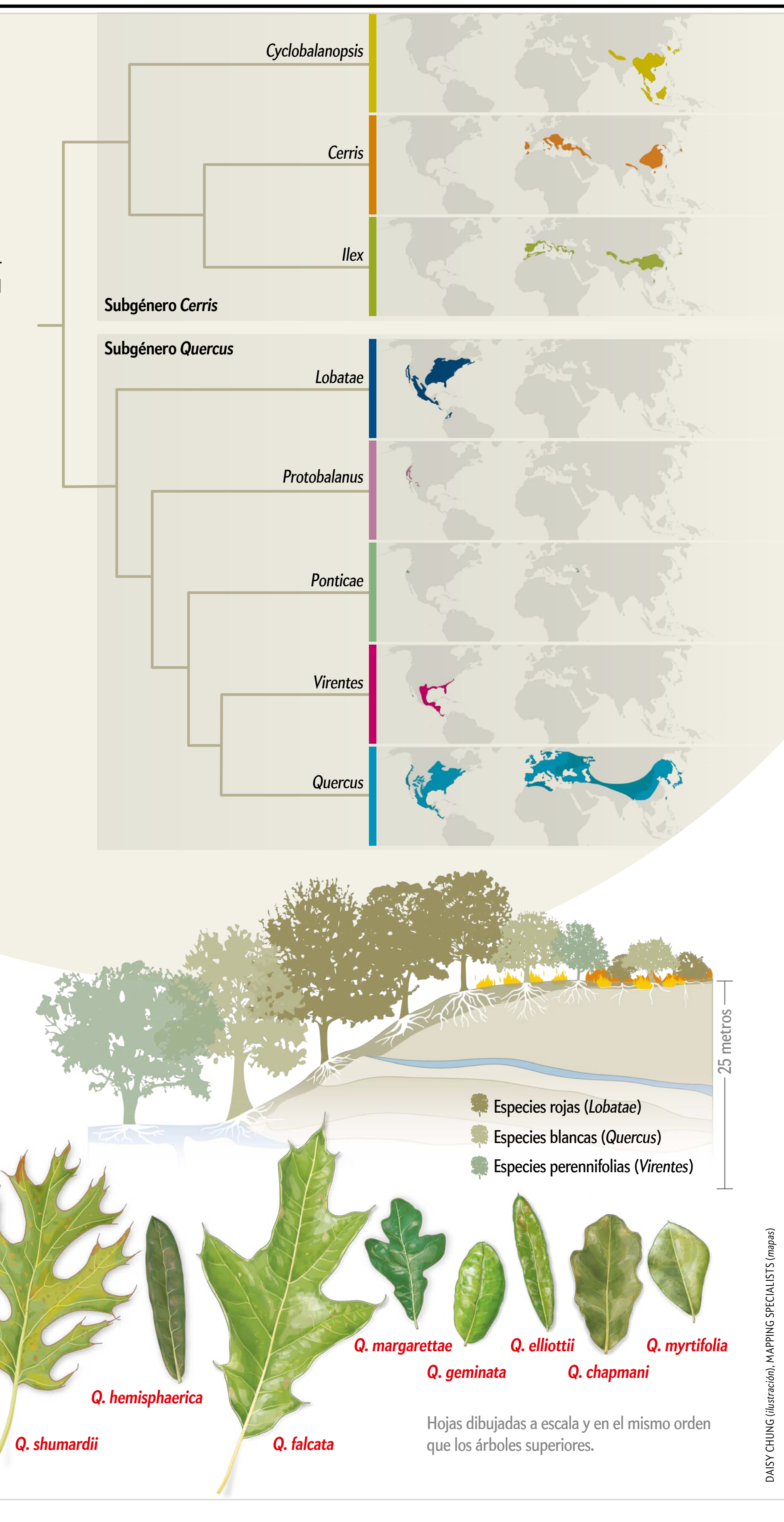
Desde hace alrededor de 56 millones de años, los robles y las encinas se han diversificado en las 435 especies que habitan en los cinco continentes. El estudio del genoma ha permitido reconstruir su proceso de especiación. Los resultados contribuyen a explicar el modo en que adquirieron semejante diversidad, sobre todo en el continente americano, donde residen cerca del 60 por ciento de las especies.

Clasificación

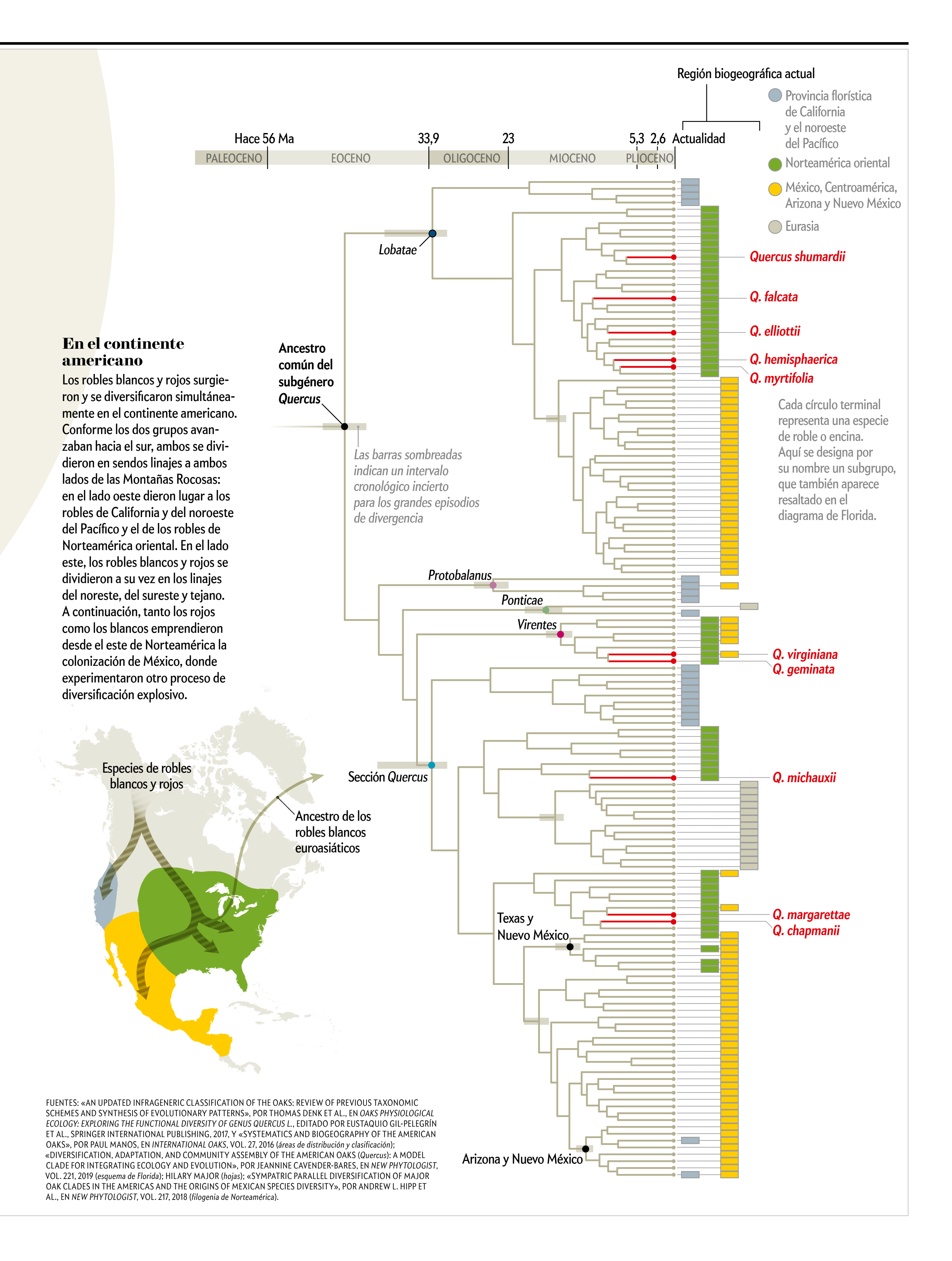
Todas las especies vivientes de robles o encinas pertenecen al género *Quercus*, que se divide en ocho grandes linajes o secciones. Dos han dominado el continente americano: las secciones *Lobatae* (robles rojos) y *Quercus* (robles blancos).

Diversidad intracomunitaria

Los robles rojos y blancos a menudo comparten el hábitat. Ambos linajes colonizaron las mismas regiones y, de forma independiente, elaboraron soluciones para los mismos problemas ecológicos. En las tierras bajas de Florida hallamos especies distintas de roble blanco en los hábitats de colinas arenosas, matorral y barrancas, modelados por el relieve cárstico y los incendios. Los robles rojos y los miembros de un tercer linaje (*Virentes*) siguen la misma pauta. La disponibilidad de agua y la intensidad del régimen de incendios estructuran estas comunidades de *Quercus*.



DAISY CHUNG (*ilustración*), MAPPING SPECIALISTS (*mapas*)



En el continente americano

Los robles blancos y rojos surgieron y se diversificaron simultáneamente en el continente americano. Conforme los dos grupos avanzaban hacia el sur, ambos se dividieron en sendos linajes a ambos lados de las Montañas Rocosas: en el lado oeste dieron lugar a los robles de California y del noroeste del Pacífico y el de los robles de Norteamérica oriental. En el lado este, los robles blancos y rojos se dividieron a su vez en los linajes del noreste, del sureste y tejano. A continuación, tanto los rojos como los blancos emprendieron desde el este de Norteamérica la colonización de México, donde experimentaron otro proceso de diversificación explosivo.

FUENTES: «AN UPDATED INFRAGENERIC CLASSIFICATION OF THE OAKS: REVIEW OF PREVIOUS TAXONOMIC SCHEMES AND SYNTHESIS OF EVOLUTIONARY PATTERNS», POR THOMAS DENK ET AL., EN *OAKS PHYSIOLOGICAL ECOLOGY: EXPLORING THE FUNCTIONAL DIVERSITY OF GENUS QUERCUS L.*, EDITADO POR EUSTAQUIO GIL-PELEGRÍN ET AL., SPRINGER INTERNATIONAL PUBLISHING, 2017, Y «SYSTEMATICS AND BIOGEOGRAPHY OF THE AMERICAN OAKS», POR PAUL MANOS, EN *INTERNATIONAL OAKS*, VOL. 27, 2016 (*áreas de distribución y clasificación*); «DIVERSIFICATION, ADAPTATION, AND COMMUNITY ASSEMBLY OF THE AMERICAN OAKS (*Quercus*): A MODEL CLADE FOR INTEGRATING ECOLOGY AND EVOLUTION», POR JEANNINE CAVENDER-BARES, EN *NEW PHYTOLOGIST*, VOL. 221, 2019 (*esquema de Florida*); HILARY MAJOR (*hojas*); «SYMPATRIC PARALLEL DIVERSIFICATION OF MAJOR OAK CLADES IN THE AMERICAS AND THE ORIGINS OF MEXICAN SPECIES DIVERSITY», POR ANDREW L. HIPP ET AL., EN *NEW PHYTOLOGIST*, VOL. 217, 2018 (*filogenia de Norteamérica*).

Viene de la página 19
se han hibridado desde su divergencia. Y cotejando esos análisis con los datos fósiles es posible estimar la antigüedad máxima en que tuvieron lugar episodios clave de la historia evolutiva del género *Quercus*. A pesar de la complejidad de su historia genética, hemos podido deducir gran parte del proceso de especiación del género, hasta llegar a la misma base del árbol familiar.



BELLOTA FOSILIZADA descubierta en Oregón y datada en el Eoceno.

THOMAS J. BONES

RUMBO AL SUR

Tal vez no sepamos nunca cuándo o dónde surgieron los primeros robles, pero hace unos 56 millones de años una población que crecía cerca de la actual Salzburgo dejó en el suelo una pizca de la ingente cantidad de polen que producían cada primavera. Esos granos de polen, con la forma de un balón de rugby surcado por tres estrías longitudinales y cuya textura superficial varía según el linaje, constituyen el primer vestigio fósil indiscutible de su existencia. A lo largo del Eoceno inferior, América del Norte y Eurasia estaban unidas por puentes terrestres tendidos sobre el Atlántico y el Pacífico, de modo que la flora y la fauna podían cruzar sin trabas de una a otra orilla. Los robles seguramente formaban parte de una vastísima foresta que cubría Norteamérica, Asia y Europa. Esto impide afirmar con seguridad si son originarios de Eurasia y si se extendieron hasta el continente americano, o viceversa. La mejor respuesta a la pregunta sobre su lugar de origen es sencillamente que son «del norte».

Sea como fuere, no tardaron en bifurcarse en dos grandes ramas: una circunscrita a Europa, Asia y África del Norte y otra mayoritariamente a América. La separación entre los continentes era imperfecta entonces y, por ejemplo, el fósil más antiguo atribuible a un roble de cúpula anillada (subgénero *Cyclobalanopsis*), llamados así por los anillos concéntricos que dibujan las escamas leñosas del cascabillo, quedó depositado en Oregón hace unos 48 millones de años. En la actualidad este linaje solo se encuentra en el sudeste de Asia. Y los robles rojos, que hoy constituyen un grupo americano, han sido descritos en yacimientos fósiles de Europa datados en torno a 35 millones de años. Pero cuando la temperatura del planeta inició un largo descenso hace unos 52 millones de años, el frío desplazó gradualmente los robles hacia el sur, lejos de los puentes de tierra que habían conectado Eurasia con Norteamérica de manera intermitente durante los últimos 50 millones de años. Conforme el enfriamiento del clima abocaba a las poblaciones norteñas de robles a la extinción, las divisiones entre los dos continentes iban quedando más marcadas, sin que ninguna especie del clado eurasiático apareciese en el continente americano y solo dos ramas del clado americano hicieran lo propio en Eurasia.

Antes de acabar empujados muy lejos, hacia el sur, los *Quercus* se dividieron aún más en ocho grandes linajes que hoy reconocemos en los bosques actuales. Tres son netamente americanos: los rojos, los intermedios (sección *Protobalanus*) y los perennifolios meridionales (sección *Virentes*). Otro, el de los robles blancos, nació y se diversificó en América pero tuvo una ramificación en Eurasia. Sabemos que esos grandes linajes surgieron pronto en la historia del género porque uno de los fósiles americanos más antiguos pertenece a un roble blanco de 45 millones de años de antigüedad, hallado en la isla de Axel Heiberg, en Nunavut, Canadá, ya diferenciable de los rojos y los demás linajes principales. Ahora bien, los fósiles de esta fase inicial de diversificación son difíciles de asignar a ningún linaje, así que dependemos de los datos moleculares para calcular en qué momento los demás robles se diferenciaron y dieron lugar a otros linajes. La integración de los datos moleculares con ciertos fósiles indica que los ocho linajes mundiales surgieron pronto. Esta es una parte importante de la historia, porque explica lo que sucedió a continuación, cuando los robles norteamericanos experimentaron su diversificación espectacular.

TIERRAS DE OPORTUNIDAD

A medida que la temperatura media del planeta descendía, el clima de Norteamérica devino estacional. Las Montañas Rocosas siguieron ganando en altura y el efecto de barrera que crearon para las nubes secó las Grandes Llanuras. Las formaciones boscosas tropicales y de latifolios perennes que habían prosperado en toda Norteamérica quedaron paulatinamente arrinconadas hasta acabar desapareciendo hace 40 millones de años. El polen y las impresiones foliares de *Quercus* comienzan a ser más comunes en el registro fósil norteamericano de hace 35 millones de años, momento en que el descenso de las temperaturas y la estacionalidad del clima habían transformado el continente al norte de México, que pasó de ser un paisaje predominantemente tropical a uno propio de latitudes templadas. Con la desaparición de las selvas tropicales provocada por el cambio climático, surgió una oportunidad ecológica para los robles.

Los robles rojos y blancos migraron hacia el sur para ocupar ese nuevo territorio. En dicho proceso, ambos generaron nuevos linajes a uno y a otro lado de las Montañas Rocosas, las cuales actuaron como divisoria: al oeste surgirían los actuales robles de California y los de la costa noroeste del Pacífico, mientras que al este lo harían los robles del este de Norteamérica. En esta última región, cada uno de esos grandes grupos se dividió a su vez en

un linaje predominantemente nororiental, otro suroriental y otro básicamente tejano. Desde el este de Norteamérica, tal vez a través de Texas, los robles blancos y rojos se extendieron hacia México hace entre 10 y 20 millones de años.

En todas esas regiones, las palmeras y los latifolios perennes habían sido empujados más al sur o se extinguieron parcial o completamente a causa del enfriamiento y la fluctuación creciente del clima. La abundancia de hábitats vacantes permitió a los recién llegados diversificarse. Esa gran oportunidad de la que gozaron en términos ecológicos desató un proceso de radiación adaptativa, en el que las especies nacientes ocuparon con rapidez los vacíos dejados por otras. Al hacerlo, las poblaciones jóvenes se diferenciaron ecológicamente entre sí, lo cual limitó el intercambio de genes entre ellas. Quedaron aisladas reproductivamente, de modo que los genes se desplazaban menos entre las poblaciones separadas que entre los árboles de cada población. De ese modo se acumularon nuevas mutaciones y reordenaciones genéticas que diferenciaron unas poblaciones de las otras. Y a través de este proceso surgieron especies nuevas.

La radiación adaptativa alcanzó su punto máximo en México y Centroamérica, donde hoy residen cerca del 40 por ciento de todos los *Quercus* del mundo. Conviene recordar que este era un género vegetal adaptado al frío que comenzó su diseminación por todo el continente gracias al descenso de la temperatura y la aparición de estaciones más marcadas. A medida que migraban hacia el sur y se extendían por el México actual, los robles ascendieron hasta gran altura, donde la temperatura es más similar a la de su lugar de origen, y encontraron una orografía accidentada que acabó separándolos aún más en poblaciones aisladas. De modo similar, conforme colonizaban todo México evolucionaron con rapidez en el espectro hídrico, desde la escasa disponibilidad de agua hasta la abundancia. A medida que ascendían y descendían por las montañas, las poblaciones se adaptaron a diversos grados de sequía. Esta diferenciación ecológica, así como la separación física, fomentaron el aislamiento reproductor entre ellas.

En suma, el origen de la gran diversidad del género *Quercus* que hoy presenciamos en México no parece residir en las temperaturas cálidas. Y puesto que las encinas mexicanas son relativamente jóvenes en la escala de tiempo evolutiva, su gran diversidad no puede ser el fruto de largos procesos de evolución. Más bien la radiación adaptativa propició velocidades de especiación altas en esas encinas evolutivamente jóvenes a medida que colonizaban las montañas. Este cambio induce a pensar que, si los robles habían sido capaces de ascender y prosperar en las Rocosas —es decir, si habían sobrevivido a la combinación de una época de crecimiento breve y un invierno frío en las montañas del norte—, también deberían haber desarrollado una gran diversidad en esa región. Pero su herencia evolutiva simplemente no los dotó para resistir la extremada dureza de esos ambientes. Una única especie blanca se acerca a ello, el roble de Gambel (*Q. gambelii*), y está restringida al sur de las Rocosas.

Los robles tuvieron que detener al fin su marcha hacia el ecuador, quizá por la drástica reducción de la estacionalidad o por la fuerte competencia impuesta por la flora tropical, pues pocos han franqueado el istmo de Panamá y penetrado en el norte de Sudamérica. Pero la historia no acaba aquí. El viaje hacia el sur tuvo lugar realmente por partida doble, simultáneamente y en los mismos lugares. Como los robles blancos y rojos ya se habían separado en el momento en que emprendieron la colonización del sur, esta historia de diversificación sucedió en paralelo en unos y en otros. Dos linajes distintos pero íntimamente relacionados, no uno, protagonizaron el relato biogeográfico que acabamos de narrar: avance hacia el ecuador, división a ambos lados de las Rocosas y colonización de México a partir de un antepasado del este de Norteamérica. Esta circunstancia explicaría en parte la riqueza y la abundancia de *Quercus* en el continente, y es que básicamente todo sucedió por duplicado en el camino hacia el sur.

BUENOS VECINOS

Uno de los aspectos más interesantes de nuestra labor investigadora ha consistido en integrar la información genómica del árbol familiar del género *Quercus* con los estudios fisiológicos sobre la adaptación al clima y al hábitat y los estudios biocenóticos sobre la estructura de los robledales. A medida que avanzaban hacia latitudes bajas y se diversificaban en diversas regiones, los robles blancos y rojos encontraron hábitats similares y resolvieron repetidamente los mismos problemas ecológicos de formas nuevas. De resultas de ello, no es raro encontrar robles de ambos grupos compartiendo un mismo hábitat. Por ejemplo, en los suelos pedregosos pobres y los riscos del este de EE.UU. crece el blanco *Q. stellata* junto al rojo *Q. marilandica*, llamado roble de Maryland. Y en las montañas del sur de Arizona, el emblemático blanco *Q. arizonica* lo hace junto al rojo *Q. emoryi*.

Tal coexistencia se observa en las comunidades arboladas de gran parte del país, donde además se observa otra peculiaridad interesante: los parientes lejanos acostumbran a crecer juntos y, en cambio, los miembros del mismo linaje no suelen hacerlo. A lo largo del gradiente altitudinal de la sierra de Chiricahua, en el sur de Arizona, por ejemplo, las especies blancas van cediéndose el testigo a medida que ascienden ladera arriba, con una amplia transición entre ellas, fenómeno que se repite con las rojas. En las tierras bajas de Florida, diversas especies de robles blancos crecen separadas por los hábitats de las colinas arenosas, el matorral y las barrancas, modelados por el relieve cárstico y los incendios. Los rojos hacen lo mismo.

¿Qué determina ese patrón de coexistencia? La diferenciación ecológica en el seno de los robles rojos y blancos está influenciada en parte por el hecho de que ninguna especie es capaz de dominar todos los hábitats. Las especies tienden a especializarse en una parte limitada del espacio ecológico disponible. En los robles, las soluciones fisiológicas adoptadas en cada linaje subdividen el hábitat y el espacio climático que ocupan, de modo que los parientes cercanos tienden a compartir menos el mismo espacio físico. En la sierra de Chiricahua, por ejemplo, la adaptación a la aridez separa a los parientes cercanos a lo largo del gradiente altitudinal. Las especies que habitan en la parte baja de la montaña soportan bastante bien la sequía, pues se pierden las hojas durante la estación seca. Las que viven a más altitud, donde en general la humedad abunda más, se centran ante todo en resistir las oscilaciones diarias del agua disponible permitiendo que el contenido hídrico de las hojas se reduzca antes de sufrir daños.

En cambio, en la comparativamente llana Florida, los factores que estructuran las comunidades de robles son la disponibilidad de agua en el suelo y la intensidad de los incendios. Las especies estrechamente emparentadas de esas comunidades muestran soluciones de compromiso entre el ritmo de crecimiento y la tolerancia a la sequía a lo largo de gradientes de humedad, así como entre el grosor de la corteza y la capacidad de rebrotar por

medio de tallos subterráneos (rizomas) a lo largo de gradientes de intensidad del fuego. En ambas regiones, y de hecho en todo el país, se constatan soluciones paralelas tanto en los robles rojos como en los blancos, y los árboles de ambos linajes que presentan rasgos convergentes tienden a crecer juntos.

Los miembros de linajes distintos pueden coexistir bien en un hábitat porque su vulnerabilidad a las enfermedades es diferente: la cercanía de un pariente lejano dificulta la propagación de las epidemias, porque los robles blancos y rojos no suelen padecer las mismas enfermedades y plagas. Incluso existen indicios de que se prestan ayuda en el delicado momento de brotar y enraizar creando en el suelo un ambiente propicio para los hongos micorrícicos, imprescindibles para conseguir ciertos nutrientes. Y una vez que el bosque se ha consolidado, se convierten en los árboles dominantes e impiden que otros tipos se instalen. Nuestro trabajo deja claro que los orígenes evolutivos del género *Quercus* han condicionado las complejas interrelaciones ecológicas que en parte explican la gran abundancia y diversidad alcanzadas en Norteamérica. El árbol de la vida proyecta su sombra sobre la estructura de nuestros robledales y encinares.

HIBRIDACIÓN CREADORA

Ahora que podemos trazar con cierto detalle la enrevesada historia del árbol genealógico de *Quercus*, su tendencia a la hibridación adquiere aún mayor interés. La gente a veces contempla la hibridación como una fuerza destructora, que erosiona las diferencias genéticas entre las especies. Pero los robles y las encinas generan lo que se denomina un singámeon o macroespecie, en la cual especies distintivas desde el punto de vista ecológico y fisiológico persisten a pesar del frecuente intercambio de genes. Hace tiempo que se plantea que los genes intercambiados entre las especies del singámeon facilitarían su adaptación a los ambientes nuevos. Un ejemplo: ¿podrían los genes de *Q. stellata* que favorecen la adaptación a la sequía migrar al roble blanco de bellotas grandes (*Q. macrocarpa*) en las regiones meridionales, donde ambos coexisten, y facilitar la adaptación de este a la aridez creciente asociada al calentamiento global? Sabemos que existe un flujo localizado de genes entre las especies de *Quercus* y que los genes que se intercambian dependen del paisaje donde se encuentran, de las especies que coexisten y del clima y el hábitat en que crecen. Sabemos, además, que una vez que un gen pasa de una especie a otra, puede migrar más allá de esta última, impulsado aparentemente por la selección ambiental. Estos ejemplos apuntan a que el flujo de genes adaptativos podría desempeñar un papel importante en la evolución del género *Quercus*. Nos hallamos en la antesala de los estudios integradores de ecología y genómica que necesitamos para entender este proceso en profundidad.

Nos gustaría saber qué genes y características —época de floración, preferencia de hábitat, distancia geográfica— impulsan la especiación en estos árboles, y si las diferencias ecológicas evolucionan mientras las poblaciones crecen juntas o solo cuando permanecen separadas. Estamos cerca de averiguar qué genes modelan la diferenciación. Un trabajo reciente sobre especies de *Quercus* europeas indica que ciertos genes que influyen en la polinización cruzada y en las preferencias ecológicas (por ejemplo, la tolerancia a la sequía, al frío y a las plagas) intervienen en la diferenciación específica. No obstante, esos hallazgos solo nos indican que las diferencias ecológicas engendran especies, no que impulsen diferencias entre especies. Los análisis estadísticos que simulan historias alternativas de especiación indican que, en una tétrada de robles blancos comunes en Europa que hoy se hibridan, las diferencias genómicas entre las especies surgieron tras su aparición en áreas geográficas distintas, y que las oportunidades de intercambio génico solo se dieron una vez que las especies maduras entraron en contacto tras su escisión. Aun así, el alto grado de coexistencia que existe entre las especies americanas plantea la cuestión de si la hibridación contribuyó a su diversidad.

El conocimiento claro del momento, el lugar y el modo en que las especies de *Quercus* adquirieron semejante diversidad es esencial para saber si resistirán y en qué grado se adaptarán a los rápidos cambios ambientales. Cuando los glaciares iniciaron su retroceso hace 20.000 años, migraron con rapidez y la clave de esa respuesta rápida parece residir en la hibridación interespecífica. Los conocimientos que podamos adquirir sobre las ventajas adaptativas que reporta el flujo de genes son primordiales para predecir la resiliencia de estos árboles frente al cambio climático, que los expone a nuevas enfermedades causadas por hongos e insectos. A medida que los insectos transmisores de hongos fitopatógenos amplíen su área de distribución y varíen sus pautas de reproducción con el adelanto de la primavera, los robles y las encinas podrían tener dificultades para plantarles cara si no evolucionan lo bastante rápido. Como investigadores de la diversidad vegetal, el reto en la próxima década será averiguar de qué modo la diferenciación interespecífica y el intercambio de genes entre las especies influirán en el rumbo de la evolución y en la persistencia de las poblaciones de *Quercus*. Si dilucidamos esos procesos, tendremos la posibilidad de emplear ese conocimiento para predecir el aspecto que tendrán nuestros bosques en cien años o en los siglos venideros. Y quizá puedan orientar nuestros planes para asegurar la supervivencia de estos vitales árboles.

PARA SABER MÁS

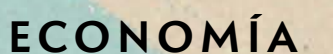
Leaf-level trade-offs between drought avoidance and desiccation recovery drive elevation stratification in arid oaks. Beth Fallon y Jeannine Cavender-Bares en *Ecosphere*, vol. 9, n.º 3, marzo de 2018.

Oaks: An evolutionary success story. Antoine Kremer y Andrew L. Hipp en *New Phytologist*, vol. 226, n.º 4, págs. 987-1011, mayo de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Robledales de España y Portugal. Evolución histórica. Pablo G. Goicoechea y Santiago Espinel en *IyC*, marzo de 2003.

Cultivo in vitro de robles y encinas. Ana M. Vieitez y Elena Corredoira en *IyC*, marzo de 2015.



LAS LIMITACIONES DEL PIB

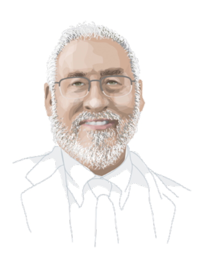
La obsesión por el producto interior bruto ha tenido efectos negativos sobre la felicidad, la salud y el medioambiente. Los economistas quieren reemplazarlo por otros indicadores

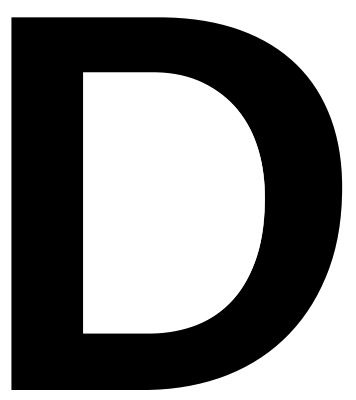
Joseph E. Stiglitz

Ilustraciones de Samantha Mash



Joseph E. Stiglitz recibió el premio Nobel de economía en 2001. Es catedrático de la Universidad de Columbia y economista jefe del Instituto Roosevelt. Presidió el Consejo de Asesores Económicos de EE.UU. entre 1995 y 1997 y fue vicepresidente y economista jefe del Banco Mundial de 1997 a 2000. También ha presidido la «comisión Sarkozy» (2008-2009) y el grupo de expertos de la OCDE para elaborar indicadores del bienestar y la sostenibilidad (2013-2019).





Desde la Segunda Guerra Mundial, la mayoría de los países han adoptado el producto interior bruto, o PIB, como indicador básico de la prosperidad. El PIB mide la producción del mercado: el valor monetario de todos los bienes y servicios que produce una economía en un determinado período, por lo general de un año. Los Gobiernos pueden caer si ese número baja, de ahí que se afanen por aumentarlo. Pero el crecimiento del PIB no garantiza el bienestar de la sociedad.

En realidad, como observó el senador Robert Kennedy, «el PIB lo mide todo, excepto aquello que hace que la vida merezca la pena». Este guarismo no evalúa la salud, la educación, la igualdad de oportunidades, el estado del medioambiente ni muchos otros indicadores de la calidad de vida. Ni siquiera cuantifica algunos aspectos cruciales de la economía, como su sostenibilidad, es decir, si se encamina o no a una crisis. Y lo que medimos es relevante, puesto que guía nuestras acciones. Los estadounidenses vislumbraron esta conexión causal durante la guerra de Vietnam: los militares concedían tanta importancia al número de bajas (el cómputo semanal de soldados enemigos muertos) que llegaron a realizar operaciones sin otro propósito que elevarlo. Como le ocurre a un borracho que busca sus llaves bajo una farola (porque es donde hay luz), el énfasis en el número de bajas les impedía tener una visión más amplia: las masacres hacían que se unieran al Vietcong más vietnamitas de los que mataba el ejército americano.

Ahora hay otro número de bajas, las causadas por la COVID-19, que se está mostrando terriblemente eficaz a la hora de medir el desempeño de la sociedad. Y no guarda demasiada relación con el PIB. Estados Unidos es el país más rico del mundo, con un PIB que en 2019 superó los 20 billones de dólares. Esa cifra daba a entender que el país poseía un motor económico muy eficiente, un coche de carreras capaz de dejar atrás a cualquier otro. Sin embargo, en junio sumaba ya más de 100.000 fallecidos, mientras que Vietnam, con un PIB de 262.000 millones de dólares (y solo un 4 por ciento del PIB per cápita estadounidense), no registraba ninguno. En la carrera por salvar vidas, ese país menos próspero ha vencido cómodamente a EE.UU.

De hecho, la economía estadounidense recuerda más a un utilitario al que le han quitado la rueda de repuesto para ahorrar gasolina, una estrategia que funciona bien hasta que uno sufre un pinchazo. Y lo que yo llamo la «filosofía del PIB», el tratar de elevar el PIB con la falsa esperanza de que eso baste para aumentar el bienestar, es lo que nos ha metido en este embrollo. Una economía que optimiza sus recursos a corto plazo presenta un mayor PIB en ese trimestre o año. El afán por maximizar este índice macroeconómico se traduce, a nivel microeconómico, en que las empresas recortan gastos para lograr el mayor beneficio posible a corto plazo. Pero, a la larga, ese enfoque miope compromete el desempeño de la economía y la sociedad.

La sanidad estadounidense, por ejemplo, se enorgullecía de usar las camas de hospital de manera muy eficiente: ninguna permanecía desocupada. Como resultado, cuando el

EN SÍNTESIS

Aunque el producto interior bruto se usa de manera casi universal para evaluar el bienestar de una sociedad, en realidad es solo una medida de la actividad del mercado.

La crisis financiera de 2008 dejó claro que necesitamos mejores formas de medir la prosperidad de sociedades y economías, así como su sostenibilidad.

En la última década, destacados académicos han creado un conjunto de indicadores para conducir las sociedades al futuro que anhelan sus ciudadanos. Varios países los están integrando en sus procesos de toma de decisiones.

SARS-CoV-2 llegó a EE.UU., solo había 2,8 camas de hospital por cada 1000 habitantes (muchas menos que en otros países avanzados) y el sistema no consiguió absorber el repentino aluvión de pacientes. Al no ofrecer bajas médicas remuneradas, las plantas de procesamiento de carne aumentaron sus beneficios a corto plazo, elevando el PIB. Pero los trabajadores no podían permitirse el lujo de quedarse en casa cuando enfermaban, así que siguieron yendo a trabajar y propagaron la infección. De modo similar, como China podía fabricar mascarillas más baratas que EE.UU., importarlas aumentaba el rendimiento económico y el PIB. Sin embargo, cuando golpeó la pandemia y el gigante asiático necesitó muchas más mascarillas de lo normal, no hubo bastantes para los sanitarios norteamericanos. En resumen, el incesante esfuerzo por maximizar el PIB a corto plazo empeoró la atención médica, provocó inseguridad física y financiera, y redujo la sostenibilidad y resiliencia económicas, lo que dejó a los estadounidenses en una posición muy vulnerable frente a la crisis, en comparación con los ciudadanos de otros países.

La frivolidad de la filosofía del PIB ya había quedado patente en los años 2000. En las décadas anteriores, los economistas europeos habían animado a sus dirigentes a seguir políticas económicas similares a las de EE.UU., al ver cómo había crecido el PIB en ese país. Pero en 2007, conforme se iban acumulando las señales de alarma en el sistema bancario estadounidense, el presidente francés, Nicolas Sarkozy, comprendió que cualquier político que se obstinara en incrementar el PIB sin atender a otros indicadores de la calidad de vida se arriesgaba a perder la confianza de la gente. En enero de 2008, Sarkozy me invitó a presidir una comisión internacional sobre la medición del desarrollo económico y el progreso social. Un grupo de expertos debía responder a una pregunta: ¿cómo podían las naciones optimizar sus criterios de medición? Sarkozy entendió que medir aquello que hace que la vida merezca la pena constituía un primer paso esencial para mejorarla.

Casualmente, nuestro informe inicial de 2009, que llevaba el provocador título de *Medir nuestras vidas: Las limitaciones del PIB como indicador de progreso*, se publicó justo después de que la crisis financiera mundial pusiera de manifiesto la necesidad de revisar los principios básicos de la ortodoxia económica. Su recepción fue tan positiva que la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) —un grupo de reflexión con 37 países miembros— decidió profundizar en el tema y formó un equipo de expertos. Tras seis años de consultas y deliberaciones, reafirmamos y ampliamos nuestra conclusión inicial: había que destronar el PIB. En su lugar, cada país debería elegir un «panel de indicadores», un pequeño conjunto de parámetros que ayudarían a encaminarlo hacia el futuro que anhelan sus ciudadanos. Además del propio PIB, como medida de la actividad del mercado (y nada más que eso), dicho panel incluiría indicadores de la salud, la sostenibilidad y cualquier otro activo al que aspiren los habitantes de un país, así como de la desigualdad, la inseguridad y demás problemas que pretendan mitigar.

Esos documentos han contribuido a que se materialice un movimiento global en pos de mejores parámetros para medir la salud social y económica. La OCDE ha adoptado ese enfoque en su «Iniciativa para una vida mejor», que recomienda 11 indicadores y ofrece a los ciudadanos una manera de evaluarlos para su país (en relación con otros), a fin de generar un índice que determine su desempeño en las áreas que les preocupan. El Banco Mundial y el Fondo Monetario Internacional (FMI), que tradicionalmente han sido firmes defensores de la filosofía del PIB, también han empezado a prestar atención al medioambiente, las desigualdades y la sostenibilidad económica.

Algunas naciones incluso han incorporado estos planteamientos a su marco de elaboración de políticas. Nueva Zelanda, por ejemplo, empleó indicadores del bienestar en su proceso presupuestario de 2019. En palabras del ministro de Finanzas, Grant Robertson, «la meta es hacer de Nueva Zelanda un gran lugar para ganarse la vida y un gran lugar para vivirla». Este énfasis en el bienestar puede explicar, en parte, el éxito del país en su lucha contra la COVID-19, que parece casi erradicada tras unos 1500 casos confirmados y 20 fallecidos, sobre una población de casi cinco millones de habitantes.

MANZANAS Y ARMAS

La necesidad agudiza el ingenio. El panel de indicadores surgió a raíz de un problema acuciante (la incapacidad del PIB para medir el bienestar, evidenciada por la Gran Recesión de 2008), pero eso mismo ocurrió con el PIB. Durante la Gran Depresión, los funcionarios estadounidenses apenas podían cuantificar el desastre. El Gobierno no recogía datos sobre la inflación o el desempleo, que habrían ayudado a encauzar la economía, así que el Departamento de Comercio le encargó al economista Simon Kuznets, de la Oficina Nacional de Investigación Económica, que creara un conjunto de estadísticas sobre los ingresos. En la década de 1940, Kuznets diseñó el PIB como un indicador sencillo que podía calcularse a partir de los escasísimos datos del mercado que existían por aquel entonces. Era un agregado del valor en dólares de los bienes y servicios producidos en el país, equivalente a la suma de todos los ingresos: salarios, beneficios, rentas e impuestos. Por este y otros trabajos, Kuznets recibió el premio Nobel de economía en 1971. (El economista Richard Stone, que creó sistemas estadísticos similares para el Reino Unido, también lo obtendría en 1984.)

No obstante, Kuznets advirtió en repetidas ocasiones de que el PIB solo medía la actividad del mercado y no debía interpretarse como un baremo del bienestar social, ni siquiera del económico. La cifra incluía numerosos bienes y servicios perjudiciales (como el armamento, desde su punto de vista) o inútiles (la especulación financiera) y no tenía en cuenta muchos otros que eran esenciales pero gratuitos (como los cuidados dispensados por las amas de casa). Una dificultad fundamental a la hora de construir un agregado de este tipo es que no existe una unidad natural para sumar el valor de las manzanas y el de las naranjas, por no hablar de cosas tan dispares como las armas, la especulación financiera y los cuidados domésticos. Así que los economistas recurren a sus precios, asumiendo que, en un mercado competitivo, estos reflejan el valor relativo que otorgamos a las manzanas, las naranjas, las armas, la especulación o los cuidados.

Aunque plantea serios problemas, esta suposición facilitaba sobremanera el cálculo del PIB. Mientras EE.UU. se recuperaba de la Gran Depresión incrementando la producción y el consumo de bienes materiales (en particular, de armas durante la Segunda Guerra Mundial), el PIB crecía con rapidez. El Banco Mundial y el FMI empezaron a financiar programas de desarrollo en antiguas colonias alrededor del mundo, y evaluaban su éxito casi exclusivamente a partir del aumento del PIB.

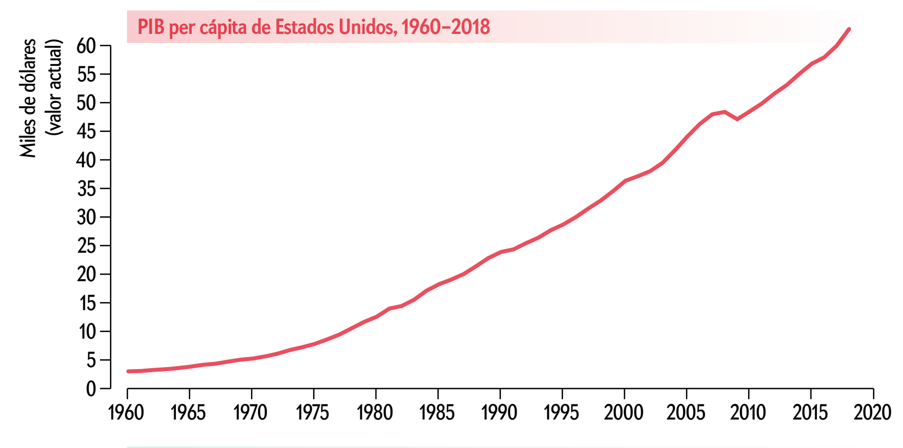
Con el tiempo, los economistas se olvidaron de los endebles fundamentos del PIB, mientras se centraban en comparar los valores de distintas épocas y países o en desarrollar complejos modelos económicos que predijeran y explicaran su evolución.

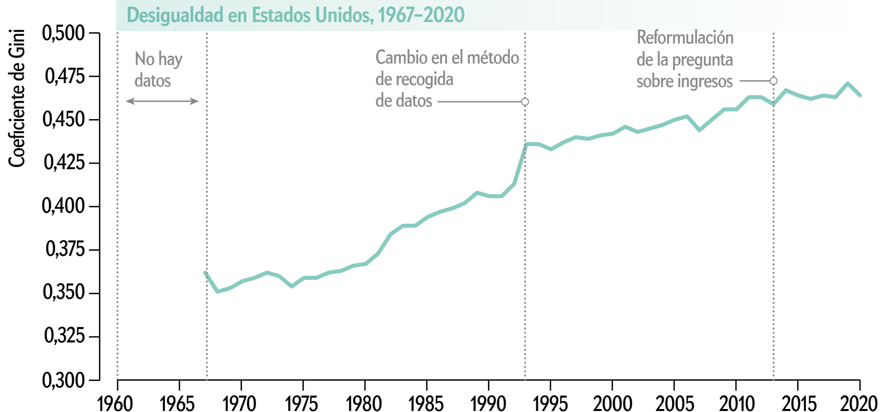
Cómo (no) cuantificar el bienestar

El producto interior bruto (PIB) mide la cantidad total de bienes y servicios que produce una economía en un cierto período, por lo general de un año. Aunque suele usarse para evaluar la prosperidad de economías y sociedades, es solo una medida de la actividad del mercado. Desde la Gran Recesión de 2008, ha surgido un movimiento global para sustituir el PIB por un panel de indicadores que ayuden a los países a avanzar hacia un futuro más sano y sostenible.

PIB y desigualdad

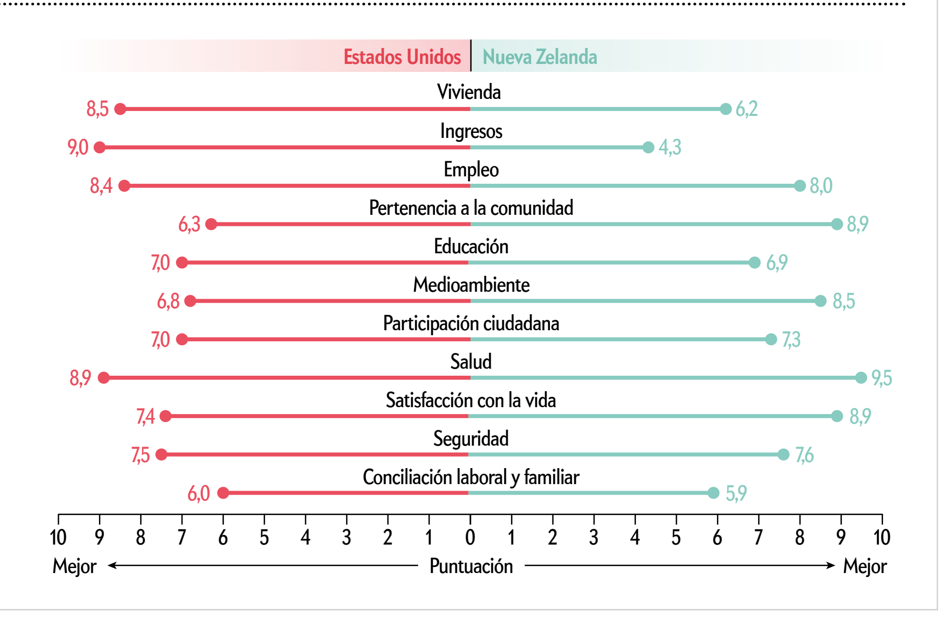
El producto interior bruto per cápita se obtiene dividiendo el PIB entre el número de habitantes de un país y puede aumentar aunque empeore la calidad de vida de la mayoría de los ciudadanos. Un indicador clave de la divergencia entre el PIB y el bienestar social es la desigualdad. En EE.UU., por ejemplo, el PIB no ha dejado de crecer desde la década de 1960, pero también lo ha hecho la desigualdad. Las tres personas con más dinero de EE.UU. acaparan más riqueza que la mitad más pobre de la población, y la pandemia está acentuando esta disparidad.





Calidad de vida

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) define 11 indicadores de la calidad de vida, y este gráfico compara los resultados de dos de sus países miembros. Aunque la renta per cápita es mucho mayor en EE.UU., Nueva Zelanda obtiene mejor puntuación en la calidad del ambiente, la salud, la satisfacción con la vida, el sentimiento de pertenencia a la comunidad y la participación ciudadana.



FUENTES: BANCO MUNDIAL (*datos del PIB*); OFICINA DEL CENSO DE EE.UU. (*datos de la desigualdad*); OCDE (*datos del «Índice para una vida mejor»*); AMANDA MONTAÑEZ (*gráficos*)

Los estudiantes rara vez estudiaban las suposiciones sobre las que se construyó el indicador y cómo afectaban a la fiabilidad de sus inferencias. En cambio, el objetivo de los análisis económicos pasó a ser explicar los movimientos de este ente artificial. El PIB se volvió hegemónico en todo el mundo y se consideraba buena cualquier política económica que lograra aumentarlo.

En 1980, tras una racha de malos resultados económicos en EE.UU. (un período de estanflación, marcado por un crecimiento lento y precios al alza), el presidente Ronald Reagan asumió el cargo con la promesa de impulsar la economía. Liberalizó el sector financiero y bajó los impuestos a los ricos, alegando que se produciría un «goteo» de beneficios hacia los menos afortunados. Aunque el PIB creció (si bien a un ritmo muy inferior al de las décadas posteriores a la Segunda Guerra Mundial), las desigualdades se dispararon. Conscientes de la importancia de las mediciones, parece que algunos miembros del Gobierno abogaron por dejar de recabar datos sobre la desigualdad: si los ciudadanos ignoraban la dimensión del problema, seguramente no se preocuparían por él.

La administración Reagan también lanzó una ofensiva sin precedentes contra el medioambiente, por ejemplo, al conceder permisos para la extracción de combustibles fósiles en millones de hectáreas de terreno público. En 1995 me uní al Consejo de Asesores Económicos del presidente Bill Clinton. Preocupados por el hecho de que nuestros indicadores prestaban muy poca atención al agotamiento de los recursos y la degradación ambiental, colaboramos con el Departamento de Comercio para desarrollar una medida del «PIB verde» que tuviera en cuenta esas pérdidas. Sin embargo, cuando los congresistas de los estados productores de carbón se enteraron, amenazaron con retirarnos la financiación si no desistíamos de nuestra empresa, y no tuvimos más remedio que hacerlo.

Los políticos sabían que, si los estadounidenses comprendían cómo de malo era el carbón para su economía (medida correctamente), querrían eliminar las subvenciones ocultas que recibe la industria del carbón. Y puede que hasta tratasen de acelerar la transición a las energías renovables. Aunque nuestros esfuerzos por definir indicadores más amplios se vieron frustrados, el hecho de que esos congresistas estuvieran dispuestos a invertir tanto capital político para detenernos me convenció de que andábamos detrás de algo realmente importante. (Y por eso no lo dudé cuando, un decenio después, Sarkozy me propuso presidir una comisión internacional para estudiar mejores formas de medir «el desarrollo económico y el progreso social».)

Abandoné el Consejo de Asesores Económicos en 1997 y, en los años siguientes, la fiebre desreguladora de la era Reagan se apoderó de la administración Clinton. El sector financiero estadounidense crecía rápidamente y elevaba el PIB, pero muchos de los beneficios que le habían otorgado tanto peso al sector eran, en cierto modo, falsos. Con sus prácticas crediticias, los banqueros habían generado una burbuja inmobiliaria que inflaba artificialmente las ganancias, y (como sus salarios estaban vinculados a estas) también sus bonificaciones. En una economía de libre mercado ideal, se supone que un aumento de los beneficios refleja un mayor bienestar social, pero las ganancias de los banqueros desmentían esta noción: buena parte de ellas resultaban de perjudicar a otros, como cuando llevaban a cabo prácticas abusivas con las tarjetas de crédito o manipulaban el LIBOR (tipo de interés interbancario del mercado de Londres, el tipo medio al que los bancos están dispuestos a prestarse dinero entre sí) para ganar aún más.

Pero lo único que reflejaba el PIB eran las cifras infladas, y estas convencieron a los responsables políticos de que lo mejor para impulsar la economía era eliminar cualquier regulación que aún afectase al sector financiero. Se suprimieron prohibiciones contra la usura —el cobro de intereses escandalosos para aprovecharse de los incautos— que llevaban mucho tiempo en vigor. En el año 2000 se aprobó la llamada Ley de Modernización de Futuros de Materias Primas, diseñada para garantizar que los derivados financieros (productos de riesgo que jugarían un papel importante en el hundimiento del sistema financiero tan solo ocho años después) nunca serían regulados. En 2005, una ley de quiebras hizo más difícil que quienes tenían problemas para pagar las facturas pudieran saldar sus deudas; los que habían solicitado un préstamo estudiantil lo tenían casi imposible.

Los responsables políticos no deberían fijarse solo en la riqueza material, sino también en la salud, el medioambiente, la igualdad y otros indicadores de la calidad de vida

A principios del siglo XXI, dos quintas partes de los beneficios de las empresas provenían del sector financiero. Esa proporción debería haber hecho saltar las alarmas: en un sistema financiero eficiente, el coste de participar en las transacciones debería ser bajo, de modo que el sector no sería muy grande. Pero el de EE.UU. era enorme. Liberar el mercado había inflado los beneficios, lo cual incrementó el PIB y, como se vio más tarde, la inestabilidad.

OPIOIDES Y HURACANES

La burbuja estalló en 2008. Los bancos habían concedido hipotecas de forma indiscriminada, dando por sentado que el precio de la vivienda no dejaría de subir. Cuando reventó la burbuja inmobiliaria, también lo hizo la economía, que se hundió como no lo había hecho desde el fin de la Segunda Guerra Mundial. Tras el rescate bancario (una sola compañía, AIG, recibió 130.000 millones de dólares del Gobierno estadounidense), el PIB creció, lo que llevó al presidente Barack Obama y a la Reserva Federal a anunciar que el país estaba en vías de recuperación. Pero la mayoría de los americanos no la experimentaron, ya que el 91 por ciento del aumento de ingresos registrado entre 2009 y 2012 fue a parar al 1 por ciento más rico de la población.

Mientras el país salía poco a poco de la recesión, otras crisis reclamaban nuestra atención: la de la desigualdad, la climática y la de los opioides. El PIB seguía creciendo, pero la esperanza de vida y otros indicadores generales de la salud empeoraban. La industria alimentaria desarrolló y comercializó de manera muy hábil productos adictivos ricos en azúcar, lo cual hizo subir el PIB pero causó una epidemia de diabetes infantil. Los opioides provocaron una oleada de muertes por sobredosis, pero los beneficios



de Purdue Pharma y otros villanos de este drama elevaron el PIB. De hecho, los gastos médicos derivados de estas crisis sanitarias también lo incrementaron. Los estadounidenses gastaban el doble que los franceses en atención sanitaria, pero tenían menor esperanza de vida. Las minas de carbón también parecían estimular la economía y, aunque contribuyeron al cambio climático y agravaron los efectos de huracanes como el Harvey, las tareas de reconstrucción también impulsaron el PIB. Este indicador daba una pátina de optimismo a los sucesos más terribles.

Esos ejemplos ilustran la divergencia entre el PIB y el bienestar social, y las múltiples razones por las que el PIB no es un buen indicador del desempeño económico. Su crecimiento antes de 2008 no era sostenible, y no se sostuvo. El incremento de los beneficios bancarios que parecía impulsar el PIB en los años previos a la crisis se produjo no solo a costa del bienestar de todas las personas de las que se aprovechó el sector financiero, sino también del PIB de los años siguientes. Mientras el aumento de la desigualdad perjudicaba a nuestra sociedad en todos los sentidos, el PIB celebraba el éxito de los bancos. Si hubo un suceso que subrayó la necesidad de establecer nuevas formas de medir el progreso económico y social, fue la crisis de 2008.

EL PANEL DE INDICADORES

La comisión, presidida por tres economistas (Amartya Sen, de la Universidad Harvard, Jean-Paul Fitoussi, del Instituto de Estudios Políticos de París, y yo), publicó su primer informe en 2009, justo tras la implosión del sistema financiero de EE.UU. Señalamos que medir algo muy simple (el porcentaje de estadounidenses que podrían tener dificultades para refinanciar su hipoteca) habría sacado a la luz las estratagemas que sustentaban el embriagador crecimiento económico anterior a la crisis y posiblemente habría servido para evitarla. Y lo que es más importante: construir y estudiar un amplio conjunto de indicadores del bienestar actual y su sostenibilidad (para saber si los buenos tiempos durarán) ayudaría a mitigar el impacto de futuras conmociones.

Cuando sube el PIB, necesitamos saber si aumenta el endeudamiento o se agotan los recursos naturales, pues eso denotaría que el crecimiento económico no es sostenible. Si la contaminación aumenta a la par que el PIB, ya sea debido a la emisión de gases de efecto invernadero o a las partículas en suspensión, el crecimiento no es sostenible desde el punto de vista ambiental. La salud de los ciudadanos es un buen indicador de la salud real de una economía, y si la esperanza de vida disminuye (incluso si es solo la de una parte de la población), como ocurría en EE.UU. ya antes de la pandemia, eso debería alarmarnos independientemente de la evolución del PIB. Y cuando la mediana de los ingresos (el valor que separa a las familias en dos mitades: las que no alcanzan esos ingresos y las que los superan) se estanca aunque aumente el PIB, eso significa que no se están repartiendo los frutos del crecimiento económico.

Por supuesto, habría sido estupendo hallar un único índice que resumiera cómo le va a una sociedad o incluso a una economía, una especie de «PIB mejorado». Sin embargo, al construir un agregado se pierde demasiada información valiosa, que es lo que sucede con el propio PIB. Imaginemos que mientras conducimos le echamos un vistazo al velocímetro, que muestra que vamos a 110 kilómetros por hora. También nos interesa la distancia que podemos recorrer antes de repostar, que resulta ser de 200 kilómetros. Ambos números son útiles, pues reflejan información

que podría influir en nuestro comportamiento. Pero supongamos que los sumamos, con o sin «pesos», para formar un agregado sencillo. ¿Qué nos diría una cifra como 310? Nada en absoluto. No sabríamos si estamos conduciendo de forma imprudente o corremos peligro de quedarnos sin gasolina.

Eso es lo que nos llevó a concluir que todos los países precisan un panel de indicadores, un conjunto de parámetros que brinden diagnósticos esenciales sobre su sociedad y economía, y sirvan para guiar sus acciones. Los responsables políticos y las organizaciones de la sociedad civil no deberían fijarse solo en la riqueza material, sino también en la salud, la educación, el ocio, el medioambiente, la igualdad, la gestión pública, la representación política, las conexiones sociales, la seguridad física y económica, y otros indicadores de la calidad de vida. Igual de relevante es que las sociedades se aseguren de que estos «bienes» no se adquieren a expensas del futuro. Para ello, han de centrarse en mantener y aumentar, en la medida de lo posible, sus reservas de capital natural, humano, físico y social. Además, diseñamos un programa de investigación para explorar los vínculos entre los diversos componentes del bienestar y la sostenibilidad, y desarrollar métodos eficaces para medirlos.

La preocupación por el cambio climático y el aumento de la desigualdad ya había ido alimentando una demanda global de mejores mediciones, y esa tendencia se materializó en nuestro informe. En 2015, un controvertido proceso político culminó con el establecimiento de 17 objetivos de desarrollo sostenible por parte de las Naciones Unidas. El avance hacia su consecución se evalúa mediante 232 indicadores, que reflejan las diversas inquietudes de Gobiernos y sociedades civiles de todo el mundo. En nuestra opinión, tener tantos parámetros no ayuda: puede ocurrir que los árboles impidan ver el bosque. Así que otro grupo de expertos, presidido por Fitoussi, Martine Durand (estadística jefa de la OCDE) y yo mismo, recomendó que cada país instituyera un sólido diálogo democrático para descubrir qué cuestiones son las más relevantes para sus ciudadanos.

Tal conversación seguramente mostraría que a la mayoría de los que vivimos en economías muy avanzadas nos importan el bienestar material, la salud, nuestro entorno y las relaciones con los demás. Queremos estar bien hoy, pero también en el futuro, y nos preocupa cómo se reparten los frutos de nuestra economía: no deseamos una sociedad en la que unos pocos acaparan todo mientras el resto vive sumido en la pobreza.

Los indicadores elegidos pueden variar con el tiempo y de un país a otro. Los países con mucho desempleo o una gran desigualdad querrán centrarse en lo que ocurre con esas variables. No obstante, por lo general queremos saber cómo nos va en comparación con los demás, y por eso recomendamos que los países avanzados compartan, al menos, cinco o diez indicadores comunes.

El PIB sería uno de ellos, junto con una medida de la desigualdad o algún baremo que describa la situación de un individuo u hogar típicos. A lo largo de los años, los economistas han formulado multitud de indicadores de la desigualdad, los cuales reflejan diferentes dimensiones del fenómeno. Es posible que las sociedades donde la desigualdad se ha tornado especialmente problemática necesiten parámetros que representen el calado de la pobreza en las clases bajas y el exceso de riqueza en las clases altas. Para mí, conocer la evolución de la mediana de los ingresos reviste una especial importancia; en EE.UU. lleva décadas casi sin experimentar cambios, a pesar de que el PIB ha aumentado.

A menudo se usa el empleo como indicador del desempeño macroeconómico: es obvio que una economía con una elevada tasa de desempleo no está aprovechando bien todos sus recursos. Sin embargo, en las sociedades donde el trabajo remunerado se asocia a la dignidad, el empleo constituye un valor en sí mismo. Otros elementos del panel de indicadores podrían referirse a la degradación ambiental (por ejemplo, la calidad del aire o del agua), la sostenibilidad económica (el endeudamiento), la salud (la esperanza de vida) o la inseguridad.

La inseguridad tiene una dimensión subjetiva y otra objetiva. Podemos analizar la percepción de la gente: cuánto le preocupa sufrir efectos adversos o lo preparada que se siente para afrontar un golpe inesperado. Pero también podemos predecir la probabilidad de que alguien caiga por debajo del umbral de pobreza en un determinado año. Y algunos componentes del panel son variables «intermedias», aspectos que pueden (o no) tener valor por sí mismos, pero que nos dan una idea de cómo se desempeñará una sociedad en el futuro. Uno de ellos es la confianza: las sociedades tienden a funcionar mejor si los ciudadanos confían en que sus Gobiernos y ellos mismos «harán lo correcto». De hecho, los países donde los habitantes muestran mayor confianza, como Vietnam y Nueva Zelanda, han lidiado con la pandemia de manera más eficaz que EE.UU., donde los niveles de confianza llevan cayendo desde la era Reagan.

Los responsables políticos han de usar esos indicadores del mismo modo que los médicos emplean sus instrumentos de diagnóstico. Cuando algún indicador aparece en amarillo o en rojo, hay que indagar más. Una desigualdad elevada o en aumento exige conocer qué aspectos concretos están empeorando.

CAPEAR EL TEMPORAL

Desde que, hace unos doce años, iniciamos nuestro trabajo sobre indicadores del bienestar, no ha dejado de sorprenderme su repercusión. Por todas partes, la atención a muchos de los elementos del panel ha impregnado la elaboración de políticas. Cada tres años la OCDE celebra una conferencia internacional con organizaciones no gubernamentales, estadísticos nacionales, funcionarios públicos y académicos que promueven el «programa del bienestar». La última tuvo lugar en Corea en noviembre de 2018 y contó con miles de asistentes.

Cuando se convoque la próxima conferencia, uno de los aspectos a tratar será sin duda la crisis global que ha desencadenado un organismo microscópico, y cuyo alcance podríamos tardar años o incluso decenios en comprender. Para recuperarnos de esta desgracia y guiar a las sociedades complejas a través de las crisis aún más devastadoras que se avecinan (el cambio climático y la pérdida de biodiversidad) necesitaremos, como mínimo, un excelente sistema de navegación. Parafraseando a la OCDE: hemos desarrollado herramientas para conducir mejor, y ha llegado el momento de usarlas. IyC

PARA SABER MÁS

Medir nuestras vidas: Las limitaciones del PIB como indicador de progreso. Joseph E. Stiglitz, Amartya Sen y Jean-Paul Fitoussi. RBA, 2013.
Measuring what counts: The global movement for well-being. Joseph E. Stiglitz, Jean-Paul Fitoussi y Martine Durand. New Press, 2019.
Capitalismo progresista: La respuesta a la era del malestar. Joseph E. Stiglitz. Ediciones Taurus, 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

Economía biofísica. Jesús Ramos Martín en *IyC*, junio de 2012.
La desigualdad en EE.UU. Joseph E. Stiglitz en *IyC*, enero de 2019.



BOSQUE DE EUCALIPTOS en KwaZulu-Natal, Sudáfrica. Estas plantaciones producen madera en poco tiempo, pero pueden limitar la biodiversidad.



SOSTENIBILIDAD

LA ENCRUCIJADA DE LA BIOMASA

Las estrategias para reducir el dióxido de carbono requieren más árboles, pastos y residuos agrícolas de los que puede permitirse el planeta

Eric Toensmeier y Dennis Garrity



Eric Toensmeier es profesor en la Universidad Yale y miembro principal del proyecto Drawdown y de la ONG Global EverGreening Alliance. Es autor de *The carbon farming solution* (Chelsea Green Publishing, 2016).

Dennis Garrity es presidente de la ONG Global EverGreening Alliance. Ha sido miembro principal del Centro Mundial de Agrosilvicultura y del Instituto de Recursos Mundiales, y presidente de la ONG Landcare International.

En los campos de cultivo de las afueras de Decatur, Illinois, un camión cargado de mazorcas de maíz entra en el almacén de una fábrica de etanol propiedad del gigante agroalimentario Archer Daniels Midland. Un gran tanque de fermentación transforma el maíz en etanol, que se transportará hasta una refinería para mezclarlo con gasolina y venderlo por todo Estados Unidos. El proceso de fermentación libera dióxido de carbono, que se captura en una enorme chimenea y se encauza por una tubería hasta la boca de un pozo. Unas bombas envían el gas a gran profundidad, donde queda atrapado en la arenisca.

Este proyecto piloto, que está a punto de completar su periodo de prueba de tres años, supone una forma innovadora de retirar dióxido de carbono de la atmósfera al tiempo que se genera un producto comercial para sufragar los gastos. Las plantas de maíz absorben CO_2 mientras crecen, e inyectar el gas en la arenisca permite su almacenamiento permanente.

Pero el uso del maíz como combustible, que se disparó en EE.UU. a principios de siglo, suscita polémica. Ese maíz podría alimentar a personas y animales: las plantas para elaborar biocombustibles ocupan una tierra que podría emplearse para cultivar productos alimenticios. Además, la combustión del etanol en los vehículos produce nuevas emisiones de CO_2, al igual que la cosecha y el transporte del maíz. Y la fermentación, canalización e inyección requieren una energía que, al menos en el Medio Oeste de EE.UU., puede provenir de combustibles fósiles. Por lo tanto, no está claro que el etanol producido a partir del maíz pueda reportar una reducción neta del CO_2 atmosférico.

La fábrica de Decatur constituye un ejemplo de una serie de procesos que buscan producir «bioenergía con captura y almacenamiento de carbono» (BECAC). Aunque esa instalación usa cereales, la mayoría de las técnicas emplean plantas leñosas (árboles, arbustos y pastos), que se transforman en combustibles líquidos o se queman para generar electricidad. Las emisiones que generan esas actividades podrían almacenarse bajo tierra, aunque otra opción sería venderlas como materia prima, para usarlas en plantas químicas o inyectarlas en yacimientos petrolíferos menguantes y poder extraer más crudo [*véase* «La falacia de la captura de carbono», por David Biello; Investigación y Ciencia, marzo de 2016].

Ignorada casi por completo hace 10 años, la biomasa ocupa hoy un lugar prominente en los planes para mitigar el cambio climático. La lista de aplicaciones es larga y no deja de crecer: aparte de los biocombustibles, incluye la quema de biomasa para producir calor y electricidad, los biodigestores que generan metano comercial, el biocarbón para fertilizar el suelo, así como los bioplásticos y ciertos materiales de aislamiento y construcción. Entre las hojas de ruta con una gran dependencia de la biomasa figuran el informe *Calentamiento global de 1,5 °C*, presentado en 2018 por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), y su informe especial *El cambio climático y la tierra,* de 2019; la *Cuarta evaluación nacional del clima* de EE.UU., publicada en noviembre de 2018; y los escenarios del proyecto Drawdown, recogidos en 2020 en

EN SÍNTESIS

Las hojas de ruta para limitar el calentamiento global a 1,5 grados Celsius dependen demasiado de que los árboles y las plantas secuestren dióxido de carbono de la atmósfera.

La principal estrategia es la bioenergía con captura y almacenamiento de carbono, pero su implementación a gran escala precisaría un área de dimensiones continentales que hoy se dedica a cultivos y pastos.

La biomasa podría constituir parte de la solución si un mayor reciclaje y el uso de cocinas ecológicas redujeran la demanda y diversas técnicas de agrosilvicultura aumentaran el suministro.

PÁGINAS ANTERIORES: EMIL VON MALTITZ, GETTY IMAGES



MORLEY READ, ALAMY

PLANTAS DE CAFÉ cultivadas en los Andes de Ecuador. La cubierta de árboles proporciona sombra y hojarasca que fertiliza el suelo.

The Drawdown review. Industrias tan potentes como la eléctrica, la de los combustibles y la de los plásticos están apostando fuerte por la biomasa como materia prima, y eso augura un aumento astronómico de la demanda.

El consenso científico detrás de esas hojas de ruta es que, para preservar un clima adecuado para la civilización, el calentamiento global debe limitarse a 1,5 grados Celsius por encima de los niveles preindustriales. Eso requeriría reducir las emisiones en un 45 por ciento para 2030 y alcanzar cero emisiones netas hacia 2050 (respecto a los niveles de 2010), según el informe *Calentamiento global de 1,5 °C* del IPCC. Disponemos de un «presupuesto de carbono» (la cantidad de emisiones futuras que podemos permitirnos antes de superar el umbral de los 1,5 grados) de entre 420.000 y 580.000 millones de toneladas (Mt). Y para mantenernos por debajo de ese límite hay que reducir las emisiones y también retirar CO_2 de la atmósfera. El IPCC estima que la BECAC podría secuestrar entre 400 y 11.300 Mt al año. El proyecto Drawdown no incluye la BECAC, pero calcula una media de entre 1100 y 2500 Mt anuales gracias a otras aplicaciones de la biomasa.

El problema es que la mayoría de los planes contemplan cantidades arbitrariamente grandes de biomasa, sin tener en cuenta que el terreno necesario para producirla impone restricciones muy estrictas. Según el IPCC, para implementar la BECAC a gran escala harían falta entre 300 y 700 millones de hectáreas (Mha), superficies comparables a las de la India (328 Mha) y Australia (769 Mha). Y muchas de las tierras aptas para la BECAC ya se emplean con fines agrícolas.

Cultivar biomasa para implantar la BECAC a esa escala (olvidándonos por un momento de sus otras aplicaciones) entraría en conflicto con nuestras necesidades de campos para cultivar alimentos y de pastos para el ganado. Los bosques también se verían en una situación vulnerable, puesto que los planes prevén talarlos para obtener biomasa y sustituirlos por plantaciones de pinos o eucaliptos, extensos monocultivos de alto rendimiento que destruyen la biodiversidad.

Puede que un consumo modesto de biomasa para secuestrar carbono sí fuera sostenible y, de hecho, algunas estrategias incluso aumentan el rendimiento de los cultivos y la producción de plantas leñosas. Pero se prevé una demanda exorbitada. La BECAC plantea grandes problemas de los que nadie habla, mientras el IPCC y otros organismos se juegan el futuro climático de la biomasa a esa única carta, a pesar de que solo existen unos cinco pequeños proyectos piloto de BECAC en todo el mundo, según el Instituto Global de Captura y Almacenamiento de Carbono. Es una estrategia arriesgada para mitigar el cambio climático.

La mayor demanda de biomasa agravará aún más el serio problema en que ya se ha convertido el futuro uso del suelo. Cada vez hay más debate sobre si deberíamos dedicar más tierra a plantar soja para alimentar al ganado y satisfacer la creciente demanda de carne, si hay que usar los campos de cultivo para producir biocombustibles que reemplacen a los combustibles fósiles o cómo podríamos preservar los bosques en vez de talarlos. Un planeta con límites consustanciales no ofrece opciones ilimitadas. Ha dado comienzo una batalla global en torno a la biomasa y, si no cambian notablemente las expectativas, los gobiernos y las industrias acabarán chocando.

LA BATALLA QUE SE AVECINA

Nuestra especie siempre ha dependido de la biomasa para cubrir sus necesidades básicas, sin pensar demasiado en cuánta estaba usando. Hace mucho que las plantas leñosas son esenciales para construir herramientas, casas, edificios, barcos, papel y cartón. Se han documentado más de 1500 usos del bambú. Y, desde nuestros comienzos, la biomasa nos ha servido (literalmente) para echar leña al fuego: más de 3000 millones de personas siguen cocinando con leña a diario.

A mediados del siglo XIX, la sociedad comenzó a reemplazar la madera por los combustibles fósiles como fuente de energía, materiales y productos químicos. Esa dependencia es la base de nuestra actual prosperidad, pero también nos ha llevado al borde de una catástrofe climática.

Hoy en día, la mayor parte de la biomasa (o biomasa lignocelulósica, siendo más precisos) procede de los árboles, el bambú, los forrajes herbáceos y residuos agrícolas como los tallos del maíz. La biomasa se ha convertido en una solución climática atractiva porque, hasta cierto punto, es renovable: podemos cultivarla una y otra vez.

Todos los planes apuntan a la BECAC como principal solución climática relacionada con la biomasa. Esta estrategia, que aún es eminentemente teórica, supone capturar las emisiones de CO_2 utilizando la misma tecnología que elimina el gas de las centrales eléctricas que queman combustibles fósiles. El mayor problema reside en el volumen de biomasa que haría falta. En su informe *Calentamiento global de 1,5 °C*, el IPCC afirma que cualquier vía para limitar el calentamiento global a 1,5 o 2,0 grados Celsius pasa por retirar de la atmósfera entre 100.000 millones y un billón de toneladas de CO_2 durante este siglo. Eso exige reforestar, y las prácticas agrícolas pueden ayudar a secuestrar el carbono en los suelos y las plantas perennes; pero el IPCC presenta la BECAC como la principal herramienta para lograr atenernos al presupuesto de carbono global. Dedicar entre 300 y 700 Mha de campos de cultivo a la producción de biomasa es simplemente incompatible con la creciente necesidad de alimentos.

Implementar a gran escala la bioenergía con captura y almacenamiento de carbono requeriría entre 300 y 700 millones de hectáreas de tierra, una superficie entre las de la India y Australia

Si la producción de alimentos es innegociable, resulta difícil encontrar tierra disponible. Algunos campos abandonados podrían dedicarse al cultivo de biomasa capaz de crecer en esas tierras poco productivas, pero los ganaderos y pastores ya dejan pacer su ganado en buena parte de esos terrenos, que en su mayoría son pastizales. Y talar bosques para convertirlos en plantaciones de biomasa nos resulta impensable, aunque los principales planes climáticos lo consideran inevitable si no reducimos enseguida las emisiones globales. Los bosques son importantes sumideros de carbono, y la deforestación ya está detrás del 9 por ciento de las emisiones antropogénicas: para reducir la cantidad de dióxido de carbono y preservar la biodiversidad, debemos proteger y ampliar los bosques, no arrasarlos. Las previsiones del proyecto Drawdown son únicas en el sentido de que solo consideran nuevas fuentes de biomasa que no socaven la seguridad alimentaria ni la protección y recuperación de los bosques.

Las vías para limitar el calentamiento a 1,5 grados Celsius que no incluyen la BECAC siguen precisando cantidades poco realistas de biomasa. Nuestra insaciable sed de biocombustibles líquidos tampoco es sostenible: no hay suficientes campos donde cultivar las materias primas necesarias para reemplazar el ingente volumen de combustibles que consumimos. Si fermentáramos todo el maíz cultivado en EE.UU., el etanol producido solo cubriría el 25 por ciento de la demanda de gasolina y diésel del país... y no quedaría maíz para las personas o los animales.

Para determinar qué grado de implantación de la BECAC llevaría el suministro mundial de biomasa y alimentos a una situación insostenible, analizamos la cantidad total de biomasa empleada en todo el mundo (con cualquier fin) en 2015. Entonces pronosticamos la demanda en 2050, considerando escenarios con baja y alta dependencia de la BECAC, según lo marcado por los principales informes. En ambos casos, un mero aumento del suministro no sirvió para satisfacer la demanda en ausencia de deforestación, mientras que una mera disminución de la demanda no logró mantener la producción de biomasa dentro de las posibilidades del planeta. El único supuesto capaz de proporcionar la biomasa necesaria (en el escenario de baja dependencia de la BECAC) combinaba una reducción drástica de ciertas demandas con un aumento igualmente drástico de determinadas formas de suministro [*véase el recuadro en la página siguiente*]. Por su parte, el escenario con mayor implantación de la BECAC acabó requiriendo 450 Mha de tierra, una superficie mayor que la que ocupa toda la Unión Europea.

Pero incluso el caso con menor dependencia de la BECAC plantea importantes problemas sociales. Muchas de las tierras necesarias albergan hoy cultivos de minifundistas, pastizales usados por los pastores o bosques importantes para los pueblos indígenas. Estos terrenos podrían serles arrebatados contra su voluntad, algo que han padecido unos 12 millones de personas en los últimos años. En el sudeste asiático y Brasil se han expropiado terrenos para aumentar la producción de aceite de palma, y en partes de África, para establecer plantaciones (por ejemplo, de cacao).

MENOR CONSUMO

Si disminuye la demanda de biomasa y adoptamos métodos de suministro sostenibles, es posible reducir el CO_2 sin que la producción de alimentos ni los bosques se vean afectados. El primer paso es moderar el consumo. En todo el mundo, el reciclaje de papel ya supone un descenso anual de 484 Mt en la demanda de madera para fabricar pasta de celulosa, y el proyecto Drawdown prevé que esa cifra llegue a unas 1100 Mt al año para 2050. Este proyecto también calcula que sustituir las cocinas de leña tradicionales por otras más ecológicas (de las que existe una gran variedad) podría rebajar en 1700 Mt el consumo de madera hacia 2050, además de mejorar la salud al reducir el humo en los hogares.

PRODUCCIÓN Y DEMANDA DE BIOMASA

Los límites de la biomasa

Los principales planes para frenar el cambio climático contemplan el uso de la biomasa como materia prima para generar combustibles, electricidad, calor, productos químicos y materiales. En 2015, el suministro de biomasa cubrió la demanda y dejó un pequeño excedente. En 2050, una producción más sostenible y algunas medidas para frenar la demanda (reciclar más papel y adoptar cocinas ecológicas) podrían compensar las exigencias de los nuevos usos de la biomasa, como los biocombustibles celulósicos o los bioplásticos, pero solo si excluimos la bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECAC). Pero los planes dependen mucho de la BECAC. En 2050, la producción solo podría afrontar una implantación reducida de la BECAC, muy inferior a la requerida.

2015

Producción total de biomasa
3154 millones de toneladas (Mt)

Demanda total
2749 Mt

Excedente de 405 Mt

Plantaciones de árboles, bambú y pastos en pastizales deforestados
Residuos agrícolas
Bosques madereros
Arbustos fertilizantes en cultivos

2050 sin BECAC

Producción prevista
5150 Mt

Demanda prevista para usos tradicionales de la biomasa
3386 Mt

Más reciclaje de papel
Cocinas ecológicas
Reducciones de la demanda: 2382 Mt

Demanda para nuevos usos: 1945 Mt
Biocombustibles de segunda generación
Bioplásticos
Biocarbón
Calefacción urbana
Biogás

Demanda reajustada
2949 Mt

2050 con BECAC

Baja demanda de BECAC
(2100 Mt más, 5050 Mt en total)

Excedente de 100 Mt

Alta demanda de BECAC
(4900 Mt más, 7850 Mt en total)

Déficit de 2700 Mt

Algunos restos de biomasa que hoy se desechan (por ejemplo, los que producen el procesamiento de la madera o el cuidado de los jardines) pueden convertirse en materia prima para generar energía. Los residuos agrícolas, como los tallos y mazorcas de maíz que quedan tras la cosecha, también podrían aportar algo de biomasa sin alterar el uso de la tierra. Sin embargo, parte de ese material ya se aprovecha: cerca del 25 por ciento se usa para alimentar al ganado o mejorar las prácticas agrícolas, mientras que otro 50 por ciento se deja en los campos para que se descomponga y restaure el suelo. Eso nos deja una cuarta parte de los residuos como nueva materia prima.

En conjunto, tales enfoques podrían reducir sensiblemente la demanda de biomasa, pero no tanto como para frenar el cambio climático.

MAYOR PRODUCCIÓN

El segundo paso para alcanzar un suministro sostenible de biomasa es producir más sin que aumente la huella ecológica. Puede que el enfoque más fomentado sea una ampliación a gran escala de las plantaciones destinadas a la producción de madera comercial, enormes arboledas de eucaliptos, pinos y otras especies. Dichas plantaciones producen mucha más madera por hectárea que los bosques naturales, pero cubrir grandes extensiones de tierra con una sola especie puede minar la biodiversidad y la calidad del agua, y favorecer las inundaciones. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, en el mundo ya hay unas 294 Mha dedicadas a la explotación maderera. Aumentar esa cifra será difícil, puesto que, una vez más, la cantidad de tierra disponible es limitada.

Los bosques naturales almacenan ingentes cantidades de carbono en la madera y el suelo, así que es importante protegerlos. Sin embargo, también son vulnerables a los incendios, y no todo el carbono que retiran de la atmósfera queda secuestrado de manera permanente: al descomponerse, los árboles muertos devuelven al aire parte de él.

Algunas nuevas técnicas de producción de biomasa se están extendiendo. Una de ellas gira en torno al etanol celulósico, un combustible líquido elaborado a partir de ciertas hierbas y tallos de cultivos alimentarios. Los científicos han hecho progresos

JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*)



GETTY IMAGES

LOS BOSQUES DE BAMBÚ, como este de Arashiyama, en Kioto, ofrecen un abundante suministro de biomasa para diversos fines.

en la búsqueda de métodos eficientes para descomponer ese material fibroso. Algunos agricultores están plantando grandes extensiones de hierbas perennes, como pasto varilla (*Panicum virgatum*) y *Miscanthus*, para quemar biomasa, con la esperanza de que se desarrolle el mercado de los biocombustibles. Otra estrategia es la silvicultura de rotación corta, que consiste en plantar árboles de crecimiento rápido, como sauces y álamos, en hileras muy densas. Los árboles se talan cada dos o tres años con maquinaria pesada que fragmenta la biomasa directamente en el campo. Según el proyecto Drawdown, todos estos sistemas emplean hoy unas 200.000 hectáreas de tierra; aunque aún es un área pequeña, se prevé un gran crecimiento del sector.

UNA COEXISTENCIA PROVECHOSA

Hay maneras de incrementar considerablemente el secuestro de carbono sin dejar de usar los campos para cultivar alimentos, y algunas incluso podrían mejorar las cosechas. La técnica más extendida es la agrosilvicultura, que integra arbustos y árboles en los cultivos y pastos. En Francia, los árboles madereros y los cereales de invierno crecen sin competir en el mismo suelo, ya que las hojas de los árboles brotan en verano y el trigo lo hace en invierno. Eso permite a los agricultores producir en 100 hectáreas lo que precisaría 130 o 140 si la madera y el cereal se plantaran por separado.

También es posible incluir plantas leñosas en los pastizales. En Latinoamérica se está extendiendo con rapidez el silvopastoreo, una idea muy prometedora que consiste en plantar densas franjas de arbustos donde el ganado puede buscar hojas comestibles, así como hileras de árboles de crecimiento rápido (como los eucaliptos) muy separadas entre sí, de modo que dejen suficiente espacio para pastar. El silvopastoreo intensivo permite multiplicar por dos, o más, el rendimiento ganadero y secuestrar grandes cantidades de carbono.

Gracias a otra estrategia conocida como «energía perenne» (*evergreen energy*), los minifundistas de las regiones tropicales pueden producir en el mismo terreno alimentos y madera para obtener energía. Los agricultores plantan en sus campos arbustos leguminosos, como *Gliricidia sepium*, cuyo frondoso follaje fertiliza el suelo y proporciona forraje para el ganado. Al final de la estación seca, recogen la madera de los arbustos y la utilizan como combustible doméstico, o la venden a productores locales que la queman para generar electricidad. Este método puede aumentar de manera drástica la producción de alimentos y la energía obtenida a partir de la biomasa, y permite almacenar carbono cada año en el suelo y las raíces. También puede suponer una fuente de ingresos y empleo para las comunidades rurales. La energía perenne ya está extendida

en Sri Lanka, se está desarrollando en África y podría funcionar bien en Asia y Latinoamérica. Si acaba implantándose, sería una manera ideal de producir biomasa para la BECAC sin sacrificar la producción de alimentos.

La expansión de la agrosilvicultura tiene un gran potencial. Según la ONG Global EverGreening Alliance, se espera que los árboles y arbustos plantados como fertilizantes produzcan 1200 Mt de biomasa hacia 2050. Y ya es una práctica generalizada: el 43 por ciento de las tierras agrícolas del planeta tienen más de un 10 por ciento de cobertura arbórea, la mayoría de ellas situadas en las regiones tropicales. La presencia de árboles en explotaciones agrícolas aumentó un 2 por ciento a nivel mundial entre 2000 y 2010. En los trópicos, millones de familias ya han adoptado la agrosilvicultura y otras lo están haciendo. Global EverGreening Alliance ha lanzado una campaña con el objetivo de retirar 20.000 millones de toneladas de CO_2 al año hacia mediados de siglo. Sin embargo, para hacer realidad todo este potencial, habrá que proporcionar un apoyo constante a los agricultores a través de los servicios de extensión agraria.

Pese a los esfuerzos de unos pocos científicos y agricultores comprometidos, EE.UU. va a la zaga del resto del mundo en materia de agrosilvicultura. Y no hay ninguna razón biofísica que lo explique: esta técnica se ha aplicado con éxito en otras regiones templadas y en los ensayos realizados en EE.UU, así que la reticencia responde más a una cuestión de mentalidad. La mecanización de la agricultura tampoco es un factor limitante: alrededor del 9 por ciento de las tierras de labranza de la Unión Europea emplean la agrosilvicultura. Tal vez la producción de biomasa podría comenzar en los bordes de los campos e irse abriendo camino hacia el interior. (Plantar hileras de árboles a lo largo de los campos para cortar los vientos erosivos ayudó al centro de EE.UU. a superar el periodo de intensas tormentas de polvo conocido como *Dust Bowl*, en la década de 1930.) Francia y China ya han desarrollado sistemas para integrar árboles en grandes explotaciones mecanizadas, e India también está haciendo importantes avances en esa dirección.

En las explotaciones mecanizadas de regiones como el «cinturón del maíz» del Medio Oeste de EE.UU., podrían incluirse plantas herbáceas perennes como pasto varilla o *Miscanthus*. Estas hierbas altas se pueden cultivar, cosechar y transportar hasta biorrefinerías para producir combustibles o electricidad. La agricultura de precisión ayuda a identificar las áreas menos productivas de los campos, que podrían aprovecharse para el cultivo de estos pastos perennes.

Al procesar ciertas hierbas para obtener energía, también puede obtenerse un producto denominado concentrado de proteína foliar, que contiene un 50 por ciento de proteínas y es rico en vitaminas y minerales. Aunque es apto para el consumo humano, puede ser más útil como sustitutivo de la soja para el ganado. Tales pastos producen más proteínas por hectárea que la soja o cualquier otro cultivo alimenticio y, dado que son perennes, secuestran carbono en el suelo.

EL CAMINO A SEGUIR

No es posible ni deseable plantar biomasa en una superficie del tamaño de Australia para satisfacer la demanda de BECAC y del resto de soluciones climáticas. Producir y consumir biomasa de un modo más inteligente podría reducir el dióxido de carbono sin afectar al suministro de alimentos o a los bosques, pero no solucionaría nuestros problemas climáticos. El IPCC acierta al señalar que los escenarios con más probabilidades de limitar el calentamiento a 1,5 grados Celsius requieren políticas coherentes y coordinadas para aumentar la seguridad alimentaria y minimizar los cambios en el uso de la tierra. Aun así, alcanzar cero emisiones netas de gases de efecto invernadero exigirá transformaciones rápidas y profundas, como una reducción del consumo de los países e individuos más ricos, la transición a energías limpias y la electrificación del transporte y la industria.

Tal vez podamos inspirarnos en poblaciones locales que ya persiguen un futuro inteligente basado en la biomasa. Los miembros de la cooperativa de campesinos Las Cañadas, en Veracruz, México, nos brindan un ejemplo interesante. La tala había convertido en pastizales entre el 70 y el 90 por ciento del bosque de niebla autóctono. En un enclave tan montañoso, las energías solar y eólica no son opciones prometedoras, y una veintena de familias aplican las mejores prácticas del mundo relacionadas con la biomasa para abordar sus necesidades. Han integrado plantas leñosas en sus campos de maíz y pastos, han plantado bambú y árboles madereros de crecimiento rápido y capaces de rebrotar, han reforestado la zona con 50.000 árboles de especies autóctonas, han adoptado cocinas ecológicas que consumen menos leña y experimentan con un gasificador que genera electricidad quemando madera. Ricardo Romero, uno de los miembros de la cooperativa, estima que una familia puede cubrir sus necesidades anuales de combustible para cocinar con una parcela de unos 26 por 26 metros. Quizás todos podríamos aprender de su propuesta. IyC



PARA SABER MÁS

Calentamiento global de 1,5 °C. IPCC, 2019. Disponible en **www.ipcc.ch/sr15**

Bioenergy and carbon capture and storage. Christopher Consoli. Global CCS Institute, 2019. Disponible en **https://bit.ly/33bAUoB**

El cambio climático y la tierra. IPCC, 2020. Disponible en **www.ipcc.ch/srccl**

The Drawdown review. Proyecto Drawdown, 2020. Disponible en **www.drawdown.org/drawdown-review**

EN NUESTRO ARCHIVO

Energía y producción alimentaria. Duncan Graham-Rowe en *IyC*, agosto de 2012.

Una cura para el suelo de África. John P. Reganold y Jerry D. Glover en *IyC*, julio de 2016.

Secuestro de carbono en los suelos forestales. Pere Rovira en *IyC*, marzo de 2017.

El último recurso. Richard Conniff en *IyC*, marzo de 2019.

ANTROPOLOGÍA

La supervivencia del más amable

La selección natural de los rasgos hipersociales permitió que la especie dominante de la Tierra se impusiera a los neandertales y otros competidores

Brian Hare y Vanessa Woods

Ilustraciones de Matt Harrison Clough



Brian Hare es profesor de antropología evolutiva, psicología y neurociencia en la Universidad Duke.

Vanessa Woods es investigadora en el Centro de Cognición Canina de Duke. Recientemente, ella y Hare han publicado el libro *Survival of the friendliest* (Random House, 2020).



Somos los únicos humanos, pero no hace tanto teníamos compañía. En sus aproximadamente 300.000 años de existencia, *Homo sapiens* ha compartido el planeta con al menos otras cuatro especies humanas. En retrospectiva, parece obvio por qué prevalecimos: éramos los mejores cazadores, los más inteligentes y los más diestros tecnológicamente.

Pero esa solo es la historia que nos contamos a nosotros mismos: otras especies humanas tenían tecnologías más avanzadas, llevaban mucho más tiempo sobre el planeta (un millón de años) o poseían cerebros tan voluminosos como los nuestros, o aún mayores. Si retrocediéramos 100.000 años y tuviéramos que adivinar qué especie humana iba a prosperar, seguramente habríamos apostado por otros humanos, tal vez los neandertales.

Compartimos un antepasado común con los neandertales. Eran más fuertes que nosotros, de pecho grueso y musculoso, y muy hábiles con las armas, lo que les permitió cazar todos los grandes mamíferos de la Edad del Hielo. Incluso compartían con nosotros una variante del gen *FOXP2*, que se considera necesario para los movimientos perfectamente calibrados que requiere el habla. Su cultura era muy avanzada: los neandertales enterraban a sus muertos, cuidaban de los enfermos y heridos, se pintaban con pigmentos y se adornaban con joyas hechas con conchas, plumas y huesos.

Los primeros *H. sapiens* que llegaron a Europa se encontraron con una población relativamente numerosa de neandertales que estaban bien adaptados a un clima frío. Más tarde, los humanos modernos huyeron ante el avance de los glaciares, mientras que los neandertales se quedaron y prosperaron. En comparación con nuestros parientes vivos más cercanos, los bonobos y los chimpancés, nuestra especie posee muy poca variación genética. Eso hace pensar que, en algún momento (y quizás en más de una ocasión), experimentamos un cuello de botella poblacional que nos llevó al borde de la extinción.

Si no éramos ni los más fuertes ni los más listos, ¿cómo nos impusimos?

AUTODOMESTICACIÓN HUMANA

Resulta que éramos más amigables que las otras especies humanas. Lo que nos permitió prosperar fue una especie de superpoder cognitivo, una clase particular de afabilidad llamada comunicación cooperativa. Somos expertos en colaborar con otras personas, incluso con extraños: podemos comunicarnos con alguien a quien no conocemos acerca de un objetivo común y cooperar para alcanzarlo. Este superpoder se desarrolla antes de que seamos capaces de caminar o hablar, y constituye la puerta de acceso a un complejo mundo social y cultural. Nos permite conectar nuestras mentes con las de los demás y heredar los conocimientos de las generaciones pasadas, y es la base de todas las formas de cultura y aprendizaje, incluido el lenguaje elaborado.

Esta cordialidad evolucionó mediante la autodomesticación. La domesticación es un proceso que conlleva una intensa selección de la amigabilidad. Un animal domesticado, aparte de volverse mucho más amistoso, sufre diversos cambios que parecen no guardar relación entre sí. Este «síndrome de la domesticación» se manifiesta en la forma del rostro, el tamaño de los dientes y la pigmentación de distintas partes del cuerpo o del pelo, e incluye alteraciones en las hormonas, los ciclos reproductivos y el sistema nervioso. Aunque vemos la domesticación como algo que les hacemos a los animales, también puede producirse a través de la selección natural, y entonces se conoce como autodomesticación.

La hipótesis de la autodomesticación se ha desarrollado en los últimos veinte años, a partir de nuestro trabajo con el antropólogo Richard Wrangham, de la Universidad Harvard, y el psicólogo Michael Tomasello, de la Universidad Duke. Lo que descubrimos es que la autodomesticación también potencia la clave de nuestro éxito: la capacidad de comunicarnos cooperativamente con los demás. Según la hipótesis, si *H. sapiens* se hubiera autodomesticado, deberíamos hallar pruebas de una selección de la amigabilidad durante el Pleistoceno (hace entre 2,6 millones y 11.700 años). Aunque el comportamiento no queda fosilizado, las neurohormonas que regulan la conducta moldean nuestros esqueletos, y podemos buscar esos cambios en los especímenes paleoantropológicos.

Por ejemplo, una mayor cantidad de testosterona durante la pubertad se traduce en un arco superciliar más grueso y una

EN SÍNTESIS

¿Cómo logramos ser la especie humana que sobrevivió? Hace cien mil años, puede que los neandertales tuvieran más opciones de prevalecer.

Homo sapiens se impuso a sus parientes gracias a un proceso de selección natural de la amigabilidad que permitió la aparición de una intensa colaboración grupal.

Este avance social supuso el inicio de las tradiciones culturales y las tecnologías que nos convirtieron en los últimos humanos sobre la Tierra.



Del lobo al perro

La evolución del animal que se convirtió en nuestra mascota favorita también vino marcada por su disposición amistosa

Los humanos no somos los únicos que experimentamos la autodomesticación: también lo hicieron nuestros parientes más cercanos, los bonobos, y la especie que consideramos nuestra mejor amiga. Los perros y los lobos se diferencian en una mínima fracción del genoma, pero mientras millones de perros se acurrucan plácidamente en nuestros hogares, los lobos rozan la extinción. Es cierto que los perros se chocan con las puertas y beben agua del inodoro, pero también protegen a nuestros seres queridos, libran nuestras batallas, detectan drogas y tumores, calman a los niños autistas y nos brindan amor incondicional y una razón para salir a hacer ejercicio.

Cuando comenzamos nuestras investigaciones, hace casi 20 años, descubrimos que los perros también poseen una gran inteligencia: interpretan nuestros gestos mejor que cualquier otra especie, incluidos los bonobos y los chimpancés. Los lobos, en cambio, son misteriosos e impredecibles. Su hogar es la naturaleza, y esa naturaleza está desapareciendo.

Pero, no hace tanto tiempo, la carrera evolutiva entre perros y lobos estaba tan igualada que no era obvio quién saldría vencedor. Los perros, de hecho, no descienden de los lobos, sino que ambas especies comparten un antepasado común, al que llamaremos lobo de la Edad del Hielo [*véase* «Del lobo al perro», por Virginia Morell; Investigación y Ciencia, septiembre de 2015]. A estos lobos les fue muy bien: sobrevivieron a la extinción de todos los grandes carnívoros (dientes de sable, leones de las cavernas y hienas gigantes), se propagaron por casi todo el hemisferio norte y se convirtieron en uno de los depredadores más eficaces del planeta.

De acuerdo con el folclore, los humanos llevaron cachorros de lobo a sus campamentos y los domesticaron. Como escribió en 1974 el experto en lobos David Mech, «está claro que los primeros humanos domaron y domesticaron los lobos, y acabaron criándolos de manera selectiva hasta crear el perro doméstico (*Canis familiaris*) a partir de ellos».

Pero esta historia no se sostiene. La doma ocurre durante la vida de un animal, mientras que la domesticación requiere varias generaciones y conlleva cambios en el genoma. Esa es solo una de las diferencias entre domesticar y domar un animal. Los lobos actuales comen demasiada carne (hasta 9 kilos de una sola vez) como para poder ser compañeros de caza estables, y los lobos de la Edad del Hielo eran mucho más grandes. En la época en que se domesticó al perro, los humanos eran cazadores-recolectores que salían en busca de alimento mientras sus hijos esperaban en el campamento; ningún humano sensato los habría dejado desprotegidos ante un carnívoro de ese tamaño.

Los perros poseen hocicos más cortos y colmillos más pequeños que los lobos. Tienen el pelo cubierto con manchas aleatorias de distintos colores, la cola curvada (a veces hasta describir un círculo completo) y las orejas caídas. Y pueden procrear durante todo el año, en vez de presentar una temporada de cría. Estos rasgos forman parte del síndrome de la domesticación (un conjunto de cambios que surgen en las especies domesticadas), pero nadie sabía por qué aparecieron juntos ni si había alguna relación entre ellos, hasta que un genetista ruso decidió domesticar zorros en la remota Siberia.

Dmitry Belyaev empezó a criar zorros en 1959, usando un único criterio de selección: que el animal se aproximara a la mano de un humano. Tras 50 generaciones, estos zorros amistosos saltaban a los brazos de las personas, lamían sus caras y se orinaban de alegría [*véase* «Zorros convertidos en perros», por Lyudmila Trut y Lee Alan Dugatkin; Investigación y Ciencia, julio de 2017].

Cuando nuestro grupo de investigación estudió esos zorros, descubrimos que, como los perros, interpretaban mejor nuestras intenciones a partir de nuestros gestos. Aunque solo los habían criado para que no tuvieran miedo de los humanos, los zorros también sufrieron otros cambios fortuitos, entre ellos un aumento de la inteligencia social.

Así que ¿cómo se convirtieron los lobos en perros? En la Edad del Hielo, a medida que nuestras poblaciones humanas se hacían más sedentarias, probablemente generaban más desperdicios y los arrojaban fuera del campamento. Tales restos contendrían bocados tentadores para los lobos hambrientos, pero solo los animales más amistosos habrían sido capaces de rebuscarlos. Estos lobos sin duda no temían a los humanos, y si se hubieran mostrado agresivos con ellos, habrían acabado muertos.

Tales lobos amigables habrían tenido una ventaja reproductiva y más probabilidades de reproducirse entre ellos, dado que rebuscaban la comida juntos. Tras varias generaciones experimentando una selección de la afabilidad sin ninguna selección deliberada por parte del hombre, esta población especial de lobos habría comenzado a tener un aspecto diferente. Es probable que el color del pelo, las orejas y la cola empezaran a cambiar, y que nos volviésemos cada vez más tolerantes hacia esos lobos de aspecto extraño que hurgaban en la basura y no tardásemos en descubrir su singular habilidad para entender nuestros gestos.

Los animales capaces de responder a nuestras señas y voces habrían sido muy valiosos como compañeros de caza o guardianes, y también por su calidez y compañía. Poco a poco les habríamos permitido entrar en los campamentos hasta llegar al amor de la lumbre. No domesticamos a los perros: los lobos más amistosos se domesticaron a sí mismos.

En el lapso de entre 14.000 y 40.000 años que duró este proceso de domesticación, a los lobos salvajes seguramente les fue mejor que a los perros en términos cuantitativos: después de todo, es probable que los perros constituyeran otra fuente de alimento para los humanos en tiempos de escasez. El primer registro escrito de una caza de lobos data del siglo VI a.C., cuando Solón de Atenas ofreció una recompensa por cada lobo al que dieran muerte.

Este suceso marcó el inicio de una masacre sistemática que casi acaba con los lobos. En 2003, se calculó que quedaban unos 300.000 en todo el planeta. Mientras, en 2013, la población mundial de perros era de unos mil millones. La historia de los perros y los lobos demuestra cómo la cordialidad se traduce en una estrategia evolutiva ganadora.

—Brian Hare y Vanessa Woods

cara más alargada. Los hombres suelen tener arcos superciliares más grandes y prominentes, y rostros ligeramente más largos que las mujeres, por eso decimos que una cara con esos rasgos es masculina. La testosterona no es la causa directa de la agresividad humana, pero sus niveles y sus interacciones con otras hormonas modulan la conducta agresiva.

Los antropólogos a menudo destacan que, durante el Paleolítico, los humanos pasaron a tener arcos superciliares menos marcados, rostros más cortos y cabezas más pequeñas. Comprendimos que documentar esas variaciones podría desvelar cuándo se produjeron los cambios fisiológicos que conformaron a la vez nuestros cuerpos y comportamientos.

Junto a Steven Churchill y Robert Cieri, que por entonces trabajaban en Duke, descubrimos que hace más de 80.000 años, al final del Pleistoceno Medio, *H. sapiens* tenía el rostro más largo y un arco superciliar mucho más prominente que durante el Pleistoceno Superior. Los cráneos con menos de 80.000 años muestran una reducción media del 40 por ciento en la proyección del arco superciliar respecto al rostro. También son un 10 por ciento más pequeños y un 5 por ciento más estrechos que los cráneos anteriores a ese punto temporal. La tendencia se mantuvo (con algunas variaciones), de modo que los rostros de los cazadores-recolectores y agricultores modernos tienen una apariencia más delicada, lo que denota una menor cantidad de testosterona. Otra neurohormona, la serotonina, pudo haber fomentado un conjunto de cambios que condujeron a un cerebro más pequeño y una menor agresividad. Al comienzo del síndrome de la domesticación se producen incrementos de esta sustancia, que también podría intervenir en el desarrollo del cráneo.

Los fármacos que aumentan la disponibilidad de serotonina en el cerebro, como los inhibidores selectivos de la recaptación de serotonina (ISRS), hacen que las personas se muestren más colaboradoras y menos dispuestas a dañar a los demás, de acuerdo con algunos experimentos de ciencias sociales sobre los dilemas éticos y la cooperación. La serotonina no solo modifica el comportamiento: si la exposición se produce durante las primeras etapas del desarrollo, también parece alterar la morfología craneal. Las ratonas embarazadas que reciben ISRS tienen crías con hocicos más cortos y estrechos, y cráneos que podemos describir como globulares.

El resto de especies humanas poseían una frente baja y plana, y un cráneo grueso. La cabeza de los neandertales tenía forma de balón de rugby. Solo nosotros tenemos los cráneos en forma de globo que los antropólogos denominan globulares, lo cual podría indicar una mayor disponibilidad de serotonina durante nuestro desarrollo evolutivo. De acuerdo con el registro fósil, esos cambios comenzaron tras separarnos de nuestro antepasado común con los neandertales y han continuado en un pasado evolutivo relativamente reciente. De hecho, el trabajo de uno de nosotros (Hare) con Churchill y Cieri sugiere que el tamaño de nuestro cráneo (y con él, el del cerebro) se ha ido reduciendo en los últimos 20.000 años.

Si los niveles de testosterona y serotonina de *H. sapiens* variaron como resultado de la domesticación, es probable que ocurriera lo mismo con otra molécula. Al disminuir la testosterona y aumentar la serotonina, se potencian los efectos de la oxitocina sobre los vínculos sociales. Esta hormona circula por el cuerpo de la madre durante el parto y facilita la producción de leche, transmitiéndose a través de ella. El contacto visual entre los progenitores y el bebé crea un bucle interactivo de oxitocina que hace que todos ellos se sientan amorosos y amados. En un experimento realizado por el psicólogo Carsten de Dreu, de la Universidad de Leiden, y otros investigadores, las personas que inhalaban oxitocina se mostraban más colaboradoras, empáticas y confiadas al participar en juegos económicos y sociales.

Todos estos cambios tuvieron efectos duraderos en nuestras relaciones sociales. De hecho, pensamos que dieron lugar a una nueva categoría social: el extraño intragrupal. Nuestros primos evolutivos, los bonobos y los chimpancés, reconocen a los extraños basándose solo en la familiaridad, de modo que alguien que vive con ellos en su territorio es un miembro del grupo y todos los demás son extraños.

Los chimpancés pueden oír o ver a sus vecinos, pero las interacciones casi siempre son breves y hostiles; en cambio, los bonobos son más amistosos con los forasteros. Nosotros reaccionamos de distintas maneras ante los individuos desconocidos, pero, a diferencia de cualquier otro animal, también somos capaces de reconocer de inmediato si un extraño pertenece a nuestro grupo. Los humanos somos los únicos que podemos definir nuestros grupos a partir de la apariencia, el lenguaje o las creencias. Nuestra concepción cambiante de la identidad del grupo nos permite reconocer a aquellos que son como nosotros (incluso si nunca los hemos visto) y construir redes sociales mucho mayores que las de cualquier otra especie humana.

La autodomesticación es una hipótesis científica que sugiere que *Homo sapiens* experimentó una selección de la amigabilidad, como evidencian nuestros rasgos físicos y comportamientos

Todos los días nos adornamos de formas que permiten que los demás nos identifiquen; lo hacemos sin pensarlo, al ponernos la camiseta de un equipo, insignias políticas o collares con símbolos religiosos. Esta capacidad domina nuestras vidas modernas y nos anima a hacer favores grandes y pequeños, como donar un órgano a un extraño o ayudar a alguien a cruzar la calle. También nos ayuda a compartir y mejorar nuestras buenas ideas.

LUCES ENCENDIDAS

Aunque al principio nuestros primos neandertales parecían llevarnos ventaja, hará unos 80.000 años comenzaron a aparecer signos de que *H. sapiens* podía no solo prevalecer, sino prosperar.

Podemos apreciar destellos de complejidad social y tecnología avanzada en algunos restos arqueológicos que datan de cuando emergimos como especie en África, hace unos 300.000 años. Pero esos destellos eran como luces intermitentes: la tecnología y otros signos de progreso aparecían y luego desaparecían. Sin embargo, parece que hace 80.000 años, las luces se quedaron encendidas y comenzaron a intensificarse. Creemos que la nueva categoría de extraño intragrupal apareció en nuestra especie alrededor de esa época, cuando (según el registro fósil) las técnicas y tradiciones culturales avanzadas empezaron a propagarse a

grandes distancias. La expansión de las redes sociales permitió compartir más innovaciones culturales más deprisa, con lo que se disparó el progreso cultural y tecnológico.

Hace 50.000 años comenzamos a dejar indicios de nuestras crecientes redes sociales y nuestra capacidad cultural por todo el mundo. Se han descubierto joyas elaboradas con conchas a cientos de kilómetros de la costa, lo que implica que nos compensaba transportar un objeto sin ningún valor práctico o adquirirlo de otro individuo que hubiera recorrido una de nuestras primeras rutas comerciales. Y pintábamos animales en las rocas con tal destreza que los contornos de la piedra se ondulaban bajo sus cuerpos y parecían conferirles una tercera dimensión.

La noción de que la amigabilidad constituyó la clave de nuestro éxito no es nueva, como tampoco lo es la idea de que nuestra especie se volvió más inteligente. Lo que hemos descubierto es el vínculo entre ambos factores: la mayor tolerancia social fue lo que provocó cambios cognitivos, en particular los relacionados con la comunicación cooperativa.

La autodomesticación humana habría conducido tanto a un incremento de la población como a la revolución tecnológica que observamos en el registro fósil. El motor de estos cambios fue la amigabilidad, que nos permitió establecer conexiones inéditas entre grupos de innovadores. La autodomesticación nos brindó un superpoder y, en un abrir y cerrar de ojos evolutivo, nos apoderamos del mundo. Una a una, el resto de especies humanas se extinguieron.

Hay una evidente contradicción entre esta visión optimista de nuestra especie y la miseria y sufrimiento que seguimos infligiéndonos los unos a los otros. Si la autodomesticación humana explica lo mejor de nosotros, ¿explica también lo peor? ¿Cómo podemos conciliar nuestra amabilidad y nuestra crueldad?

Algunos de los cambios neurohormonales que sustentan nuestra afabilidad también promueven la violencia. La oxitocina parece esencial para la conducta paternal y se la conoce como hormona del abrazo. Pero un nombre más adecuado sería «hormona de la mamá osa». La misma oxitocina que circula en el cuerpo de la madre con la llegada del recién nacido alimenta su ira cuando alguien pone en peligro a ese bebé. Por ejemplo, las madres hámster que reciben oxitocina adicional tienen más probabilidades de atacar y morder a un macho amenazante. La oxitocina también interviene en formas relacionadas de agresividad masculina: su disponibilidad aumenta cuando una rata macho se une a su pareja, y eso hace que el macho sea más cariñoso con la hembra, pero también más proclive a atacar a un extraño que la amenace. Esta relación entre los vínculos sociales, la oxitocina y la agresividad se observa de manera generalizada en los mamíferos.

Mientras experimentábamos la autodomesticación, nuestra mayor amigabilidad también trajo consigo una nueva forma de agresividad. El hecho de que hubiera más serotonina disponible durante el crecimiento del cerebro humano aumentó el efecto de la oxitocina en nuestra conducta. Los miembros del grupo eran capaces de establecer vínculos tan fuertes que se sentían parte de la misma familia, y la nueva preocupación por los demás vino acompañada de una disposición a defender de manera impetuosa a miembros del grupo con los que no se guardaba parentesco. Los humanos nos volvimos más violentos cuando se veían amenazados aquellos a quienes la evolución nos hizo amar.

EL AMOR ES UN DEPORTE DE CONTACTO

Pese a las paradojas evolutivas de la naturaleza humana, la percepción de quién forma parte de nuestro grupo es maleable. Como especie, *H. sapiens* ya ha demostrado su capacidad para ampliar el concepto de pertenencia al grupo hasta dar cabida a miles o millones de individuos.

Y aún podemos expandirlo más. La mejor forma de mitigar los conflictos entre grupos es reducir la sensación de amenaza mediante la interacción social. Si el hecho de sentirnos amenazados hace que queramos proteger al resto de nuestro grupo, el contacto amistoso con otros grupos nos permite extender la definición del mismo.

De adultos, los niños blancos que habían ido a la escuela con niños negros en la década de 1960 se mostraban más propensos a apoyar los matrimonios interraciales, a tener amigos negros y a dar la bienvenida a gente negra en su vecindario. Y esta fórmula sigue funcionando en la educación. En la Universidad de California en Los Ángeles, los estudiantes que compartían habitación con un compañero de otra raza eran los que se sentían más cómodos con las interacciones interraciales y veían mejor las citas entre personas de distintas etnias. Un estudio también halló que imaginar un contacto positivo con las personas sin hogar (uno de los grupos más deshumanizados) ayuda a empatizar con ellas. Y la amistad entre individuos de diferentes grupos puede extenderse a otros miembros del grupo.

La mayoría de las políticas que se promulgan dan por hecho que un cambio de actitud conlleva un cambio de comportamiento; pero, en los conflictos entre grupos, es más probable que una variación de la conducta (en forma de contacto humano) modifique nuestra manera de pensar. La hipótesis de la autodomesticación explica por qué nuestra especie evolucionó para relacionarse con los demás. Entrar en contacto con personas de distinta ideología, cultura o raza constituye un recordatorio eficaz y universal de que todos pertenecemos a un único grupo llamado *H. sapiens*.

Eso nos confirió la ventaja necesaria para sobrevivir a otros homininos. En términos evolutivos, la definición de amigabilidad tiene que ver con comportamientos positivos hacia los demás, sean o no deliberados. No solo implica una gran proximidad física a medida que aumenta el tamaño del grupo, sino también la capacidad de interpretar rápidamente las intenciones de la gente. Los inmensos beneficios con que las interacciones sociales contribuyeron al éxito de nuestra especie (dándonos la posibilidad de resolver problemas mejor que cada individuo por separado) influyeron en la forma en que la selección natural moldeó nuestros cuerpos y mentes. La consiguiente capacidad de compartir conocimientos a través de generaciones dio lugar a la tecnología y la cultura que nos permitieron extendernos por todos los rincones del planeta. IyC

PARA SABER MÁS

Genios: Los perros son más inteligentes de lo que pensamos. Brian Hare y Vanessa Woods. KNS Ediciones, 2013.
Survival of the friendliest: *Homo sapiens* evolved via selection for prosociality. Brian Hare en *Annual Review of Psychology*, vol. 68, págs. 155-186, enero de 2017.

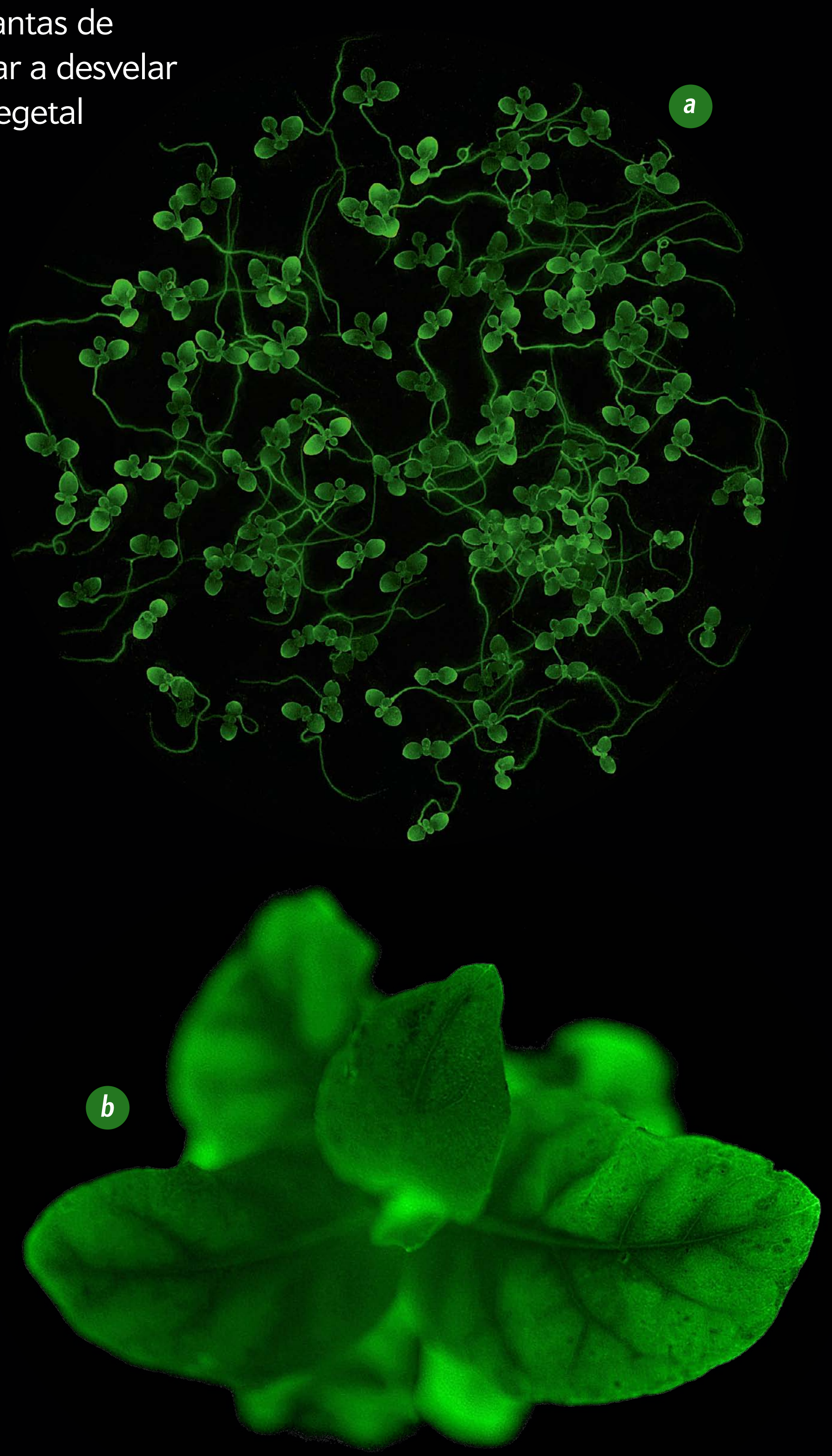
EN NUESTRO ARCHIVO

La pequeña gran diferencia. Gary Stix en *IyC*, noviembre de 2014.
Raíces del espíritu cooperativo. Frans B. M. De Waal en *IyC*, noviembre de 2014.
La especie más invasora. Curtis W. Marean en *IyC*, octubre de 2015.

por Anna Ferran Cabeza

Plantas luminosas

Una técnica que dota a las plantas de bioluminiscencia podría ayudar a desvelar incógnitas del metabolismo vegetal



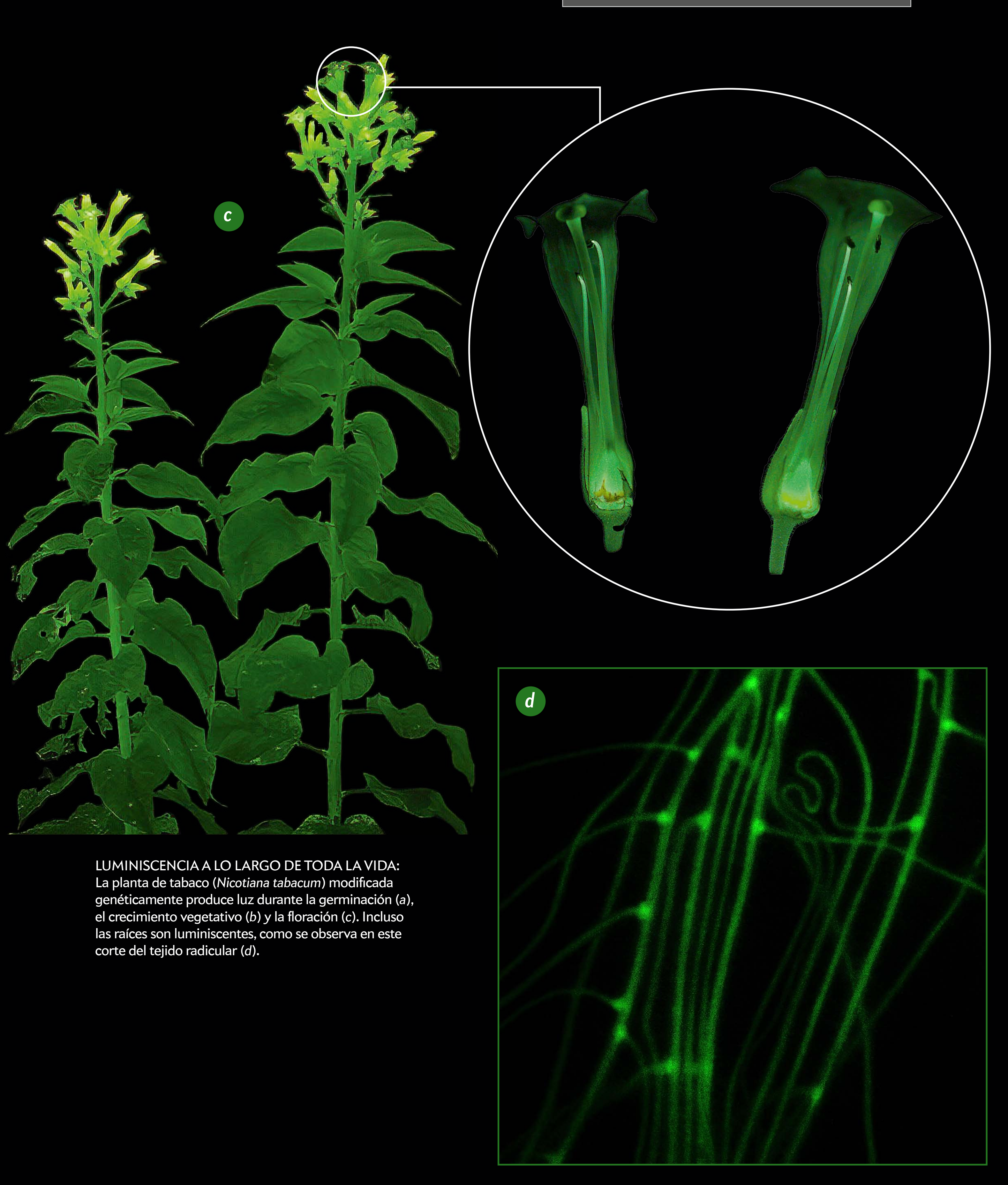
Numerosos animales y microorganismos, desde luciérnagas hasta bacterias y hongos, tienen la capacidad de emitir luz, un fenómeno conocido como bioluminiscencia. Esta se produce como resultado de la oxidación de una molécula en su organismo llamada luciferina. En los animales, la bioluminiscencia desempeña varias funciones: atraer a las parejas sexuales, engañar a las presas, comunicarse, etcétera. Sin embargo, dicha propiedad resulta inexistente en el mundo vegetal.

Ahora, un equipo internacional de científicos ha modificado genéticamente plantas de tabaco y ha conseguido que emitan brillo durante todo su ciclo biológico. Aunque con anterioridad se habían introducido genes de bioluminiscencia bacterianos en plantas, la técnica era engorrosa y producía muy poca luz. También se les había incorporado luciferina de forma exógena, pero el proceso es caro y puede resultar tóxico para la planta.

En sus experimentos, los investigadores insertaron en plantas de tabaco cuatro genes del sistema de bioluminiscencia de los hongos, el cual convierte el ácido cafeico (presente en todas las plantas) en luciferina. A continuación, cultivaron cuidadosamente las plantas y observaron que emitían una luminiscencia autosostenida. Esta podía percibirse a simple vista y a lo largo de todas las etapas del ciclo biológico, desde la fase de plántula hasta la madurez. Sus hallazgos, publicados en *Nature Biotechnology*, pueden servir de base para el desarrollo de técnicas de formación de imágenes que ayudarán a resolver enigmas del metabolismo vegetal.

—Anna Ferran Cabeza,
doctora en biología, es editora
de Investigación y Ciencia

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

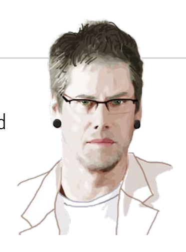


LUMINISCENCIA A LO LARGO DE TODA LA VIDA: La planta de tabaco (*Nicotiana tabacum*) modificada genéticamente produce luz durante la germinación (*a*), el crecimiento vegetativo (*b*) y la floración (*c*). Incluso las raíces son luminiscentes, como se observa en este corte del tejido radicular (*d*).

DE: PLANTS WITH GENETICALLY ENCODED AUTOLUMINESCENCE. TATIANA MITIOUCHKINA ET AL. EN *NATURE BIOTECHNOLOGY*, PUBLICADO EN LÍNEA EL 27 DE ABRIL DE 2020.

por Nathaniel Comfort

Nathaniel Comfort es catedrático de historia de la medicina en la Universidad Johns Hopkins.



Ciencia, cientificismo e identidad humana

El conocimiento biológico no ha cesado de modificar nuestra concepción del ser humano

La más icónica de las ilustraciones de la obra de Thomas Henry Huxley, *Evidence as to man's place in nature* (1863), representa una serie de esqueletos de primates marchando hacia el futuro: «gibón, orangután, chimpancé, gorila, hombre». Desde el punto de vista científico, gracias a las pruebas aportadas por la anatomía y la paleontología, no cabía ya ninguna duda sobre la posición del ser humano en la escala natural: aun encabezándola, pertenecía al reino animal.

Desplazado por Nicolás Copérnico del centro del universo, Charles Darwin acababa de desplazar al ser humano del centro del mundo viviente. Al margen del descenso de estatus, que preocupaba mucho a Darwin pero no a Huxley, el mensaje de fondo era inequívoco: solo la ciencia podía abordar la que para Huxley era la cuestión fundamental, «el lugar del ser humano en la naturaleza y su relación con el universo de las cosas».

Ingenioso y provocador, «el bulldog de Darwin» era uno de los ensayistas más solicitados de su tiempo. En el número de 16 de diciembre de 1869 de la revista *Nature*, Huxley propuso lo que entonces se denominó «darwinismo práctico» y hoy conocemos por eugenesia. Convencido de que la pervivencia del Imperio Británico dependía del «emprendedor y enérgico» carácter inglés, especuló con la posibilidad de seleccionar a los británicos según su actitud. Consciente de los dilemas legales y éticos, aventuró que «tal vez sea posible influir, indirectamente, sobre el carácter y la prosperidad de nuestros descendientes». Francis Galton, primo de Darwin y planeta exterior del sistema solar de Huxley, ya había publicado ideas similares. Con el tiempo sería considerado el padre de la eugenesia. La idea de «mejorar» la herencia humana a fin de consolidar el imperio estaba en muchas mentes.

La confianza de Huxley en el progreso inexorable de la ciencia, y la consecuente mejora y triunfo de la humanidad, ejemplifica bien la ambivalencia del ideal de la Ilustración. Las sociedades modernas se han guiado por la razón, los hechos y las verdades universales, lo que en muchos casos les ha permitido progresar. Sin embargo, la navaja de Ockham es de doble filo. Los valores ilustrados han avalado ideas tan disonantes entre sí como la de que todos los hombres nacen iguales, que es legítimo decapitar aristócratas y que se puede traficar con personas.

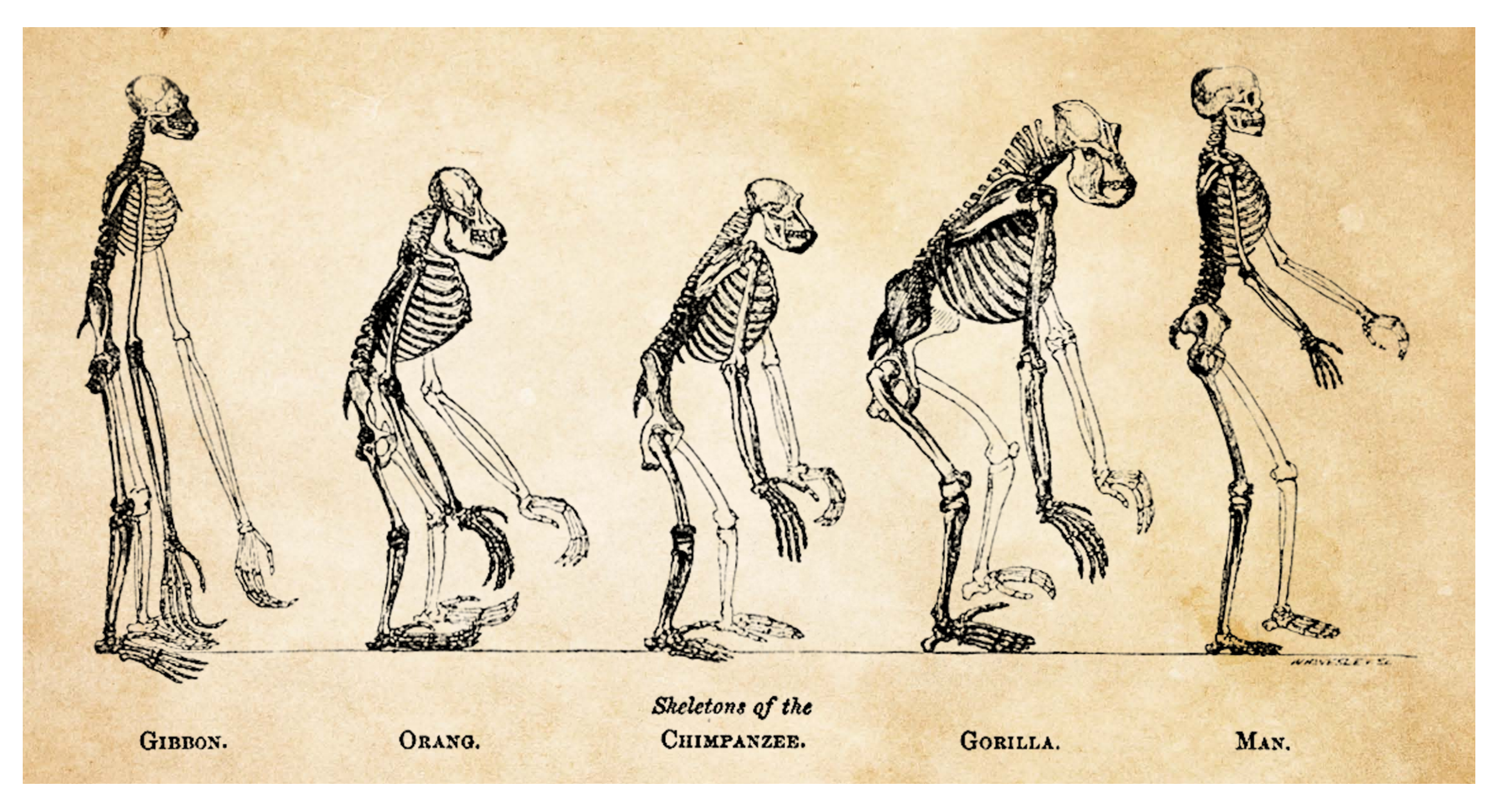
Algunos de los peores capítulos de la historia son atribuibles al cientificismo, la ideología según la cual la ciencia es el único modo válido de comprender el mundo y solucionar los problemas sociales. Mientras la ciencia ha ampliado y liberado nuestra concepción del ser humano, el cientificismo la ha limitado.

A lo largo de los últimos 150 años hemos constatado que tanto la ciencia como el cientificismo han configurado nuestra percepción de la identidad humana. La psicología del desarrollo puso énfasis en la inteligencia y transformó lo que originalmente era una herramienta pedagógica, el cociente intelectual, en un instrumento de control social. La inmunología redefinió lo «propio» en términos de lo «no-propio». La teoría de la información aportó nuevas metáforas, al describir la identidad en términos de un texto o de un esquema eléctrico. La biología molecular y celular ha cuestionado en las últimas décadas los límites del individuo [*véase* «¿Qué es un organismo individual?», por Arantza Etxeberría; Investigación y Ciencia, mayo de 2013]. Las tecnologías reproductivas, la ingeniería genética y la biología sintética han hecho que la naturaleza humana sea más maleable. La epigenética y la microbiología han problematizado la idea de autonomía e individualidad. En la era de la biotecnología y las tecnologías de la información, el yo está distribuido, disperso y atomizado.

Las identidades individuales, de raíz biológica, no habían sido nunca tan relevantes socialmente, pese a que sus límites y parámetros no dejan de difuminarse.

Los designios de la inteligencia

En 1907, el psicólogo francés Alfred Binet proclamó la necesidad «de introducir métodos de precisión científica en todos los ámbitos de la pedagogía y la educación, a fin de aportar claridad y buen sentido». Binet había desarrollado junto a Théodore Simon una serie de tests para medir la «edad mental» de los escolares franceses. Si la edad mental de un niño era menor que su edad cronológica, se le podía ayudar a reducir la diferencia [*véase* «Alfred Binet o los orígenes del cociente intelectual», por Serge Nicolas; Mente y Cerebro, n.º 23, 2007]. El psicólogo alemán William Stern denominó «cociente intelectual» al resultado que se obtiene al dividir la edad mental por la cronológica; un valor que, en teoría, permitía la comparación entre grupos. Charles Spearman, estadístico y eugenista británico de la escuela de Galton, observó la correlación entre los resultados de las distintas pruebas realizadas por un niño y la explicó a partir de una cualidad innata, fija y subyacente, a la que denominó *g*, por «inteligencia general». El psicólogo estadounidense Henry Goddard, bajo el influjo del eugenista Charles Davenport, afirmó que un cociente intelectual bajo era una característica mendeliana simple. Así, paso a paso por la senda del cientificismo, el cociente intelectual



FRONTISPICIO de *Evidence as to man's place in nature* (1863), de Thomas Henry Huxley.

WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO

dejó de medir el rendimiento pasado de un niño para predecir su rendimiento futuro [*véase* «Origen y evolución del test de inteligencia», por Annette Mülberger; Mente y Cerebro, n.º 73, 2015].

El cociente intelectual ya no medía resultados sino identidades, puntuando el valor inherente de cada persona. En la era Progresiva, los eugenistas explicaron la criminalidad, la pobreza, la promiscuidad o la enfermedad a partir de la escasa capacidad intelectual. Cuando Adolf Hitler empezó a aplicar la eugenesia a grupos étnicos o culturales, decenas de miles de personas en todo el mundo habían sido ya esterilizadas o internadas para evitar que sus genes pervivieran.

Yo no

Los inmunólogos adoptaron otra estrategia. Situaron la identidad en el cuerpo y en lugar de definirla en términos absolutos, lo hicieron a partir de la relación entre lo propio y lo no-propio. El rechazo de tejidos implantados, las alergias y las reacciones autoinmunitarias no eran síntomas de una guerra, sino de una crisis de identidad, lo que implicaba entrar de lleno en consideraciones filosóficas. Para el historiador Warwick Anderson, de la Universidad de Sídney, en el ámbito de la inmunología el pensamiento biológico y el social «se han mezclado promiscuamente bajo las palmeras, en un ambiente tropical».

El Platón de la inmunología fue el científico australiano Frank Macfarlane Burnet, galardonado con el Nobel de medicina en 1960. Su concepción de la disciplina como la ciencia de lo propio derivaba directamente de su lectura del filósofo Alfred North Whitehead. Recíprocamente, científicos sociales como Jacques Derrida, Bruno Latour o Donna Haraway han aplicado los conceptos y las imágenes de la inmunología a la comprensión del yo en sociedad. El pensamiento científico y el pensamiento social están profundamente interrelacionados y en resonancia, porque se construyen mutuamente. No podemos entender al uno sin el otro.

Burnet adoptó nuevas metáforas de la cibernética y la teoría de la información. En 1954 expresó su convencimiento de que «el espíritu de nuestro tiempo» presagiaba la aparición de «una “teoría de la comunicación” del organismo vivo», como así fue. Los biólogos moleculares adoptaron simultáneamente metáforas relativas a la información. El descubrimiento de la estructura de doble hélice del ADN, en 1953, solucionó el problema del código genético e hizo casi inevitable el uso de analogías relacionadas con el texto y la comunicación. Los biólogos moleculares hablaban de «transcripción», «traducción», «mensajeros», «transferencias» y «señales». El genoma se deletrea con un alfabeto de cuatro letras y casi siempre nos referimos a él como un texto, ya sea un libro, un manual, o un listado. No es casual que la biología molecular se desarrollara al mismo tiempo que la informática y la industria de los ordenadores.

El yo de posguerra era una clave que había que descifrar. Las secuencias de ADN podían ser digitalizadas. Sus mensajes podían ser interceptados, descifrados y programados. Era muy difícil no pensar en la naturaleza humana en términos de información. En los años sesenta, el ADN era conocido como «el secreto de la vida».

Múltiples yos

Desde finales de los sesenta, algunas voces críticas, incluidas las de científicos, mostraron su preocupación ante la nueva concepción del ser humano. En 1971, el polémico premio nóbel James Watson escribía que las implicaciones sociales y éticas de la nueva biología eran «demasiado importantes para dejarlas en manos de la comunidad científica y médica».

En 1978, Patrick Steptoe y Robert Edwards consiguieron fecundar in vitro a un ser humano. Louise Brown se convertía así en el primer «bebé probeta». En 1996, un equipo liderado por Ian Wilmut clonó una oveja a la que llamaron Dolly. La clonación humana parecía estar a un paso.

La clonación y la ingeniería genética han generado muchas preguntas pero han aportado pocas respuestas. La creación de un ser humano genera tanta fascinación como terror. ¿Qué tipo de persona sería? ¿Tendría los mismos derechos que cualquier otra persona? Un bebé concebido para la donación de tejidos, ¿ha sido deshumanizado? ¿Tenemos derecho a modificar los genes de aquellos que no han nacido? O, más bien, se argumenta provocativamente, ¿tenemos la obligación de hacerlo? El desarrollo de potentes técnicas de edición genética, como CRISPR, exige ampliar la participación en la toma de estas decisiones.

Los argumentos a favor o en contra de la ingeniería genética suelen basarse en una concepción determinista de la identidad genética. El cientificismo es un arma de doble filo. Desde un punto de vista reduccionista, puede localizarse la naturaleza humana en el interior del núcleo de la célula. En 1902, el médico inglés Archibald Garrod introdujo la idea de una «individualidad química» de carácter genético. En los años noventa, cuando el primer tsunami de secuencias genómicas alcanzó las costas de la ciencia básica, se hizo evidente que la variación genética humana era mucho mayor de lo esperado. Garrod ha devenido un tótem de la era genómica.

A finales del siglo xx, los más visionarios anunciaban una «medicina personalizada» basada en el genoma. Lejos de las tallas únicas, el diagnóstico y la terapia se harían a la medida del ADN de cada uno. El Proyecto Genoma Humano hizo caer en picado el coste de la secuenciación genómica y la puso al alcance de la cultura de masas.

Las universidades más proclives al uso de la tecnología ofrecen perfiles genómicos a sus estudiantes de nuevo ingreso. Hay empresas que utilizan el genoma para ofrecer a sus clientes compras personalizadas, desde listas de vinos a complementos nutricionales, pasando por todo tipo de productos cosméticos. La secuencia genómica es el yo. El kit de secuenciación de la empresa 23andMe lo indica claramente: «Bienvenido a ti» («*Welcome to you*»).

¿Dónde están los límites?

Solo que tu genoma no lo es todo, ni mucho menos [*véase* «¿El horóscopo en mi genoma?», por Michael Shermer; Investigación y Ciencia, mayo de 2019]. La concepción del ADN como plan maestro ha caducado. Para empezar, no todas las células del cuerpo tienen los mismos cromosomas. Las mujeres cisgénero son mosaicos: la inactivación aleatoria de un cromosoma X de cada célula significa que la mitad de las células de una mujer expresan los cromosomas X de su madre y la otra mitad los de su padre. Las madres son quimeras que intercambian células con el feto a través de la placenta.

La teoría de la información aportó nuevas metáforas, al describir la identidad en los términos de un texto o un esquema eléctrico

También se da quimerismo entre especies. Existen embriones chimpacé-humano de laboratorio y se investiga la formación en cerdos de órganos humanos inmunotolerantes [*véase* «Órganos humanos fabricados dentro de animales», por Juan Carlos Izpisúa Belmonte; Investigación y Ciencia, enero de 2017]. Los genes, las proteínas y los microorganismos fluyen a través de las formas de vida sin solución de continuidad. John Lennon tenía razón: «Yo soy él como tú eres él como tú eres yo y todos somos juntos» («*I am he as you are he as you are me and we are all together*»).

Lo cierto es que, en términos estrictamente científicos, somos algo más que el contenido de nuestros cromosomas. El cuerpo humano contiene tantas células no humanas (bacterias, arqueas y hongos) como humanas. Las decenas de miles de especies microbianas que se aglomeran en nuestro cuerpo condicionan la digestión, la complexión, la resistencia a las enfermedades, la visión o el estado de ánimo. Sin ellas, no nos sentiríamos del mismo modo; de hecho, no seríamos los mismos. Actualmente concebimos el yo biológico como un conjunto de comunidades intercomunicadas.

También estas se mezclan promiscuamente bajo las palmeras. Un grupo de investigadores de la Universidad canadiense de Waterloo, encabezado por Andrew C. Doxey, publicó en 2017 en *mSystems* un estudio según el cual el microbioma de una persona permite identificar a su pareja sexual en un 86 por ciento de casos. Las comunidades más similares entre los miembros de una pareja se hallan en los pies. En cambio, el microbioma de los muslos está más correlacionado con el propio sexo biológico que con la identidad de nuestra pareja.

Una parte del cuerpo, una alcantarilla, un vagón de metro, un aula... cualquier lugar con una comunidad característica, posee una cierta identidad genética. En tales comunidades, la información genética circula entre organismos individuales a través del sexo, la predación, la infección y la transferencia horizontal de genes. Estudios recientes muestran que las comunidades de microbios simbióticos de los mejillones de aguas profundas llegan a aislarse genéticamente, como las especies. En los hongos, los genes llamados *Spok* (por *spore-killer*, «destructores de esporas») fluyen y se recombinan entre especies por impulso meiótico (*meiotic drive*), un proceso genómico rápido que permite el cambio genético hereditario en respuesta a un entorno cambiante. La genetista Barbara McClintock ha descrito el genoma como un órgano sensitivo de la célula.

La epigenética ha difuminado aún más los límites del yo. Los mensajes codificados en el ADN pueden ser modificados de múltiples formas: mezclando y combinando módulos de ADN; ocultando fragmentos para que no sean leídos; o cambiando el mensaje una vez leído, alterando el significado durante la traducción. El ADN ha dejado de ser un texto sagrado que se trasmite fielmente de una generación a otra. Los últimos hallazgos presentan más bien al genoma nuclear como un conjunto heterogéneo de sugerencias, frases para viajar, sílabas y palabras sin sentido que pueden ser usadas y modificadas a voluntad. Más que la sede del yo, el genoma parece una caja de herramientas para configurar el yo. Si es así, ¿quién lo configura?

El yo distribuido

Los implantes cerebrales, las interfaces humano-máquina y otros dispositivos neurotécnicos introducen al yo en el «universo de las cosas». Neuralink, una em-

presa de Elon Musk con sede en San Francisco, California, quiere hacer realidad el sueño de una interfaz fluida entre mente y máquina, propio de la ciencia ficción. La inteligencia natural y la inteligencia artificial ya conviven y cabe pensar que un día puedan fusionarse.

Podemos preguntarnos si, más allá del yo extendido, puede hablarse de un yo distribuido. Philip Ball, divulgador científico y antiguo editor de *Nature*, cedió células epiteliales para que los investigadores las convirtieran en células madre, con el potencial para convertirse en cualquier órgano, y las cultivaran en forma de «minicerebro», un tejido neuronal capaz de generar los impulsos eléctricos característicos de las regiones del cerebro [*véase* «Cerebros creados en el laboratorio», por Jürgen A. Knoblich; Investigación y Ciencia, marzo de 2017]. Aunque están lejos de hacerse realidad, hay investigaciones en curso sobre otros temas clásicos de la ciencia ficción, como el cultivo de cerebros en placas de Petri o el de órganos humanos en animales de granja.

Autocontrol

Sin embargo, estas nociones ilustradas de la identidad y de un futuro posthumano propio de la ciencia ficción presentan un problema: han sido elaboradas por hombres con estudios universitarios, sin discapacidades, pertenecientes a las clases altas y medias de las naciones más ricas del Norte global. Sus ideas no reflejan solo sus hallazgos, sino también los valores que han dominado la ciencia durante demasiado tiempo: el positivismo, el reduccionismo y el control de la naturaleza. La historia la escribirá quien domine las técnicas de secuenciación.

Pero algo está cambiando. Aunque queda mucho por hacer, la atención a la igualdad, la inclusión y la diversidad ha empezado a transformar nuestras ideas sobre la salud, la enfermedad y el significado de ser humano. Es relevante saber que Henrietta Lacks, cuyas células cancerígenas fueron cultivadas y distribuidas sin su consentimiento por laboratorios de todo el mundo, era una afroamericana pobre. Su historia ha propiciado un intenso debate sobre la desigualdad y el sesgo en biomedicina, y ha tenido efectos sobre los procedimientos del mayor organismo de investigación biomédica de los Estados Unidos, los Institutos Nacionales de la Salud.

A través de su estudio de la genealogía genómica desde una perspectiva afroamericana, la socióloga Alondra Nelson ha revelado los emotivos esfuerzos de muchas familias por recuperar una historia compleja, perdida durante el Pasaje del medio (*Middle Passage*, la travesía entre África y América). La historiadora Kim TallBear ha mostrado que, en el seno de la comunidad nativa nortamericana, la identidad genética ha sido coproducida por la ciencia occidental y la cultura indígena. Las concepciones étnicas basadas en el ADN son problemáticas, pero las iniciativas para democratizar y hacer accesibles las tecnologías del yo, a fin de que favorezcan la autodeterminación en lugar del control social, son fundamentalmente liberadoras.

Esto es muy evidente en el caso de las personas discapacitadas que usan tecnologías de asistencia. Con ellas adquieren o recuperan modos de percepción, se comunican o expresan de nuevas formas, y amplían sus relaciones con el universo de las cosas.

La artista Lisa Park trabaja con estas ideas. A partir de la retroacción de técnicas sensoriales neurológicas, crea representaciones audiovisuales del yo. Cuando los visitantes de una exposición unen sus manos, aparece un árbol de luz; las ondas encefalográficas de Park resuenan armónicamente con las ondas en un depósito de agua; una «orquesta» de músicos cíborg, equipados con pulsómetros y sensores cerebrales, crean una música fascinante siguiendo las indicaciones de Park, la directora, quitándose vendas de los ojos, mirándose, riendo, tocándose o besándose. Pero incluso este sentido interactivo, artístico y subjetivo del yo está ligado a una identidad limitada por la biología.

Desde la Ilustración hemos definido y valorado la identidad humana a partir de los valores de la propia ciencia, como si solo ella pudiera decirnos quienes somos. Es una noción extraña y miope. Ante el colonialismo, la esclavitud, las epidemias de opiáceos, la degradación ambiental y el cambio climático, no es posible sostener que solo la ciencia y la tecnología occidentales son fuentes fiables de autoconocimiento. Ello no supone para nada culpar a la ciencia de la miseria humana. El problema no es la ciencia sino el cientificismo. Definir el yo exclusivamente en términos biológicos tiende a eclipsar otras formas de identidad, como el propio trabajo o rol social. Después de todo, puede que la respuesta a la cuestión fundamental de Huxley no sea un número. IyC

Artículo original publicado en *Nature* vol. 574, págs. 167-170, 2019. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2019

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

The incidence of alkaptonuria: A study in chemical individuality. Archibald E. Garrod en *The Lancet*, vol. 160, n.° 4137, págs. 1616-1620, diciembre de 1902.
Getting ahead of one's self?: The common culture of immunology and philosophy. Warwick Anderson en *Isis*, vol. 105, n.° 3, págs. 606-616, septiembre de 2014.
Are we really vastly outnumbered? Revisiting the ratio of bacterial to host cells in humans. R. Sender, S. Fuchs y R. Milo en *Cell*, vol. 164, n.° 3, págs. 337-340, enero de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

El mecanismo de la inmunidad. Macfarlane Burnet en «Las defensas del organismo», VV.AA., colección *Temas* de *IyC* n.° 23, 2001.
Origen y evolución del test de inteligencia. Annette Mülberger en *MyC* n.° 73, 2015.
Yo, mi cerebro y mi otro yo (digital). Mariano Asla en *IyC*, noviembre de 2018.
Entre Darwin y Huxley. José Manuel Sánchez Ron en *IyC*, mayo de 2019.

por Nora D. Volkow



Nora D. Volkow es directora del Instituto Nacional sobre el Abuso de Drogas, adscrito a los Institutos Nacionales de Salud de los Estados Unidos.

El estigma de la adicción

En contra de lo que dice la ciencia, muchos creen que las adicciones son señal de debilidad moral

El alcoholismo y las toxicomanías matan a decenas de miles de personas al año y arruinan la vida de muchas más. Disponemos de tratamientos eficaces, como los medicamentos contra los trastornos relacionados con el consumo de alcohol y opiáceos, que podrían evitar un porcentaje notable de esas muertes. Sin embargo, no se utilizan lo suficiente y, en muchos casos, las personas a quienes podrían beneficiar ni siquiera acuden en su busca. Entre los principales motivos está el estigma en torno a las adicciones.

La estigmatización es un problema asociado a diferentes enfermedades, desde el VIH hasta los trastornos mentales, pero es especialmente cruel en los trastornos por consumo de drogas. Aunque hace mucho tiempo la medicina llegó al consenso de que las adicciones constituyen una alteración cerebral compleja, se sigue culpando a las personas que las sufren. La población general, así como muchos trabajadores de los ámbitos sanitario y judicial, continúan viendo la adicción como una endeblez moral y un defecto del carácter.

En la esfera sanitaria, si se culpa a los pacientes de sus problemas con el alcohol o las drogas, se corre el riesgo de prestarles una atención deficiente e incluso de rechazar a los que necesitan tratamiento. En las urgencias, por ejemplo, las personas con adicciones pueden toparse con un muro de desprecio si los profesionales consideran que tratar los problemas de drogas no forma parte de su trabajo. Así es como se expulsa a las personas que presentan signos de embriaguez o síntomas de abstinencia, ya sea porque los trabajadores les tienen miedo o porque sospechan que están allí para pedir más drogas. Las personas con adicciones pueden interiorizar el estigma y la vergüenza y negarse a buscar el tratamiento que necesitan.

En un viaje a Puerto Rico que hice hace años, visité en San Juan un «narcopiso», un local improvisado por los toxicómanos, donde un hombre se pinchaba heroína en la pierna, que tenía muy infectada. Le insté a que fuese a urgencias cuanto antes, pero en veces anteriores le habían humillado de tal forma que prefería hacer peligrar su vida, o arriesgarse a que le amputaran una pierna, con tal de no pasar de nuevo por ese trance.



Además de dificultar la administración de tratamientos y menoscabar la confianza de los pacientes en los servicios sociosanitarios, el estigma también los impulsa a seguir consumiendo. En las investigaciones realizadas por Marco Venniro, del Instituto Nacional sobre el Abuso de Drogas de los Estados Unidos, se ha observado que los ratones drogodependientes prefieren la interacción social a la droga cuando se les da a elegir, pero cuando se los priva de la socialización, recurren a la droga. Los humanos también somos seres sociales y algunos recurrimos a las drogas para aliviar el sufrimiento físico y moral. El rechazo que sufren las personas estigmatizadas por su consumo tóxico actúa como poderosa privación social, la cual perpetúa e incluso intensifica más el consumo.

La estigmatización de las personas con drogadicciones puede complicarse aún más, si cabe, en la actual crisis de la COVID-19. Sumado a los riesgos inherentes a la indigencia y al consumo de drogas, el miedo legítimo al contagio puede hacer que un transeúnte no socorra a una persona con una sobredosis en la calle o que no se le administre la naloxona que necesita para sobrevivir. También existe el peligro de que los hospitales, al estar saturados, releguen a los drogodependientes a un lugar secundario en la delicada priorización de recursos humanos y materiales.

Aliviar el estigma de los toxicómanos y enfermos mentales no es fácil, en parte porque este se nutre del desasosiego que suscitan al romper las normas sociales. Los propios trabajadores sanitarios muchas veces no saben actuar ante una persona que se muestra agresiva por los síntomas de abstinencia o por el efecto de ciertos alucinógenos (como la fenciclidina, o PCP) si no cuentan con formación específica. En este sentido, es indispensable que todo el personal sanitario, desde técnicos de urgencias hasta médicos y enfermeros, reciba la formación necesaria para atender de manera competente a estas personas. Tratar a los pacientes con dignidad y compasión es el primer paso.

Es preciso reconocer que, en la adicción, la propensión a sufrir alteraciones cerebrales está muy determinada por factores ajenos al control de la persona, como su genética y el entorno en el que nace y crece, y que a menudo se necesita atención médica para facilitar la recuperación y prevenir situaciones nefastas, como una sobredosis. Cuando se estigmatiza y se desprecia a las personas con adicciones, sobre todo desde el sistema sanitario, lo único que se consigue es reforzar el círculo vicioso del que tan difícil les resulta salir.

MARÍA HERGUETA


MÁS DE 140 PREMIOS NÓBEL
han explicado sus hallazgos en
Investigación y Ciencia
ALFR. NOBEL
NAT. MDCCC XXXIII OB. MDCCC XCVI
®© THE NOBEL FOUNDATION
Descubre todos los artículos en
www.investigacionyciencia.es/nobel



UNIVERSOS EN

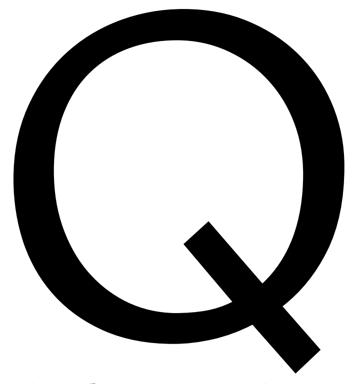


LA CIÉNAGA

Un nuevo programa de investigación intenta cartografiar qué teorías físicas son incompatibles con la gravedad cuántica. Los resultados podrían tener consecuencias verificables en cosmología y física de partículas

Luis Ibáñez

Luis E. Ibáñez es catedrático de física teórica de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM) y director del Instituto de Física Teórica, un centro mixto de la UAM y el CSIC.

UIZÁ LA FUERZA DE LA NATURALEZA QUE EL SER HUMANO COMENZÓ A ESTUdiar más pronto fuera la gravedad. Hoy en día, sin embargo, esta sigue siendo la interacción fundamental peor conocida. Por un lado, se diferencia de las demás en que aún seguimos sin entender por completo su encaje con las leyes de la mecánica cuántica. Por otro, la aplicación de la teoría vigente de la gravedad al estudio de la estructura y evolución del universo como un todo ha supuesto la aparición de nuevos enigmas, uno de ellos especialmente espinoso: hoy por hoy, ignoramos de dónde procede el 70 por ciento del contenido energético total del universo.

En los últimos años, varias ideas procedentes de la teoría de cuerdas han cristalizado en un programa de investigación que aspira a relacionar esos problemas. En cierto modo, dicho programa da la vuelta al que hasta ahora ha sido el enfoque tradicional de la disciplina: en lugar de preguntarse qué leyes físicas pueden obtenerse a partir de la teoría de cuerdas y los principios de la gravedad cuántica, trata de identificar cuáles son incompatibles con ellos. Dicho conjunto de teorías inviables, o universos imposibles, ha sido bautizado con el nombre de «ciénaga». Al imponer que el mundo que observamos a nuestro alrededor quede excluido de la ciénaga, varios trabajos han obtenido implicaciones potencialmente verificables que, en caso confirmarse, obligarían a cambiar por completo el modelo cosmológico vigente. Al mismo tiempo, tales ideas han sugerido una nueva manera de afrontar un problema que desde hace décadas ocupa a los físicos teóricos: ¿por qué los valores de las masas de las partículas elementales son tan diminutos?

UN MISTERIO CÓSMICO

La teoría que describe el comportamiento de la gravedad a grandes distancias es la teoría de la relatividad general de Albert Einstein. Esta ve la gravedad como un fenómeno geométrico: la masa y la energía curvan el espaciotiempo, y dicha curvatura dicta la manera en que se mueven los objetos circundantes. Hasta ahora, la relatividad general ha superado todas las pruebas experimentales imaginables. Describe a la perfección fenómenos que van desde la gravedad terrestre o el movimiento de los astros hasta otros mucho más exóticos, como las ondas gravitacionales emitidas durante la colisión de agujeros negros o estrellas de neutrones, detectadas por primera vez hace pocos años.

La teoría describe también la evolución del universo como un todo, desde el momento de la gran explosión, ocurrida hace unos 14.000 millones de años, hasta nuestros días. Y en particular, permite inferir el contenido de materia y energía del cosmos. Gracias a ella, en las últimas décadas hemos aprendido que tan solo el 15 por ciento de toda la materia presente en el universo se compone de átomos ordinarios. El 85 por ciento restante es materia «oscura»: una sustancia invisible y de naturaleza hasta ahora desconocida, pero cuya existencia puede inferirse con claridad a partir del tirón gravitatorio que ejerce sobre las estrellas y las galaxias.

Por otra parte, si consideramos la energía total presente en el universo, los datos cosmológicos revelan que, además, existe una energía difusa extendida por todo el espacio. De naturaleza también desconocida, esta «energía oscura» da cuenta de aproximadamente el 70 por ciento de toda la energía contenida en el cosmos (el 30 por ciento restante corresponde a la energía asociada a la materia ordinaria y la materia oscura). Más enigmática aún que la materia oscura, el origen de esta forma de energía constituye hoy en día una de las mayores preguntas a las que se enfrenta la física fundamental.

Hasta hace aproximadamente veinte años se pensaba que tal energía era exactamente nula. De hecho, varios físicos teóricos intentaron demostrar —sin éxito— que así tenía que ser. A finales

EN SÍNTESIS

La teoría de cuerdas es una de las candidatas más firmes a una teoría cuántica de la gravedad. Sin embargo, predice una enorme cantidad de universos posibles, algo que ha dificultado enormemente la elaboración de predicciones comprobables.

En los últimos años, varios trabajos han argumentado que, en realidad, una cantidad aún mayor de universos y leyes físicas serían incompatibles con la teoría de cuerdas. Ese conjunto de universos imposibles se conoce con el nombre de «ciénaga».

La ciénaga parece descartar varios de los modelos más usados para explicar la energía oscura o la inflación cósmica. Al mismo tiempo, podría apuntar a una conexión insospechada entre la masa de los neutrinos y la densidad de energía oscura.

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES/DENNIS CASEY/ISTOCK, MODIFICADA POR *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

del siglo pasado, sin embargo, diversas observaciones relativas a la manera en que se alejan las galaxias distantes revelaron que todo el universo se hallaba impregnado por una densidad de energía constante y de signo positivo. En unidades cotidianas, esta densidad de energía oscura, ρ_{EO}, asciende a

$$\rho_{EO} \approx 5 \cdot 10^{-10} \text{ julios/metro}^3.$$

Este valor es diminuto. Para hacernos una idea, viene a ser unas 10^{30} veces menor que la densidad de energía contenida en un átomo de hidrógeno. Sin embargo, el hecho de que la energía oscura llene por completo todo el universo hace que esta dé cuenta de la mayor parte su contenido energético total. Por otro lado, que su signo sea positivo implica que el universo no solo se expande, sino que lo hace cada vez más rápido. (Si su signo fuera negativo, la expansión cósmica estaría frenándose, justo lo contrario de lo que muestran las observaciones cosmológicas).

Pero ¿qué es lo que determina el signo y la magnitud de esta forma de energía? Y más importante aún, ¿cuál es su origen? Son varias las razones que llevan a pensar que la respuesta a esta pregunta se halla relacionada con otro de los grandes retos a los que se enfrenta la física fundamental: la formulación de una teoría de la gravedad compatible con las leyes de la mecánica cuántica.

EL PROBLEMA DE LA GRAVEDAD

Sabemos que en la naturaleza existen cuatro tipos de interacciones fundamentales. Una de las más familiares es la interacción electromagnética. Esta tiene lugar entre partículas dotadas de carga eléctrica mediante el intercambio de ciertas partículas elementales sin masa (los fotones, o partículas de luz), y se halla en la base de todos los procesos químicos y biológicos. A ella hay que sumar la interacción nuclear fuerte, responsable de mantener unidos los protones y los neutrones en los núcleos atómicos, y la interacción débil, causante de las desintegraciones radiactivas.

Para estas tres interacciones fundamentales existe una descripción compatible con la teoría de la relatividad especial de Einstein y con los principios de la mecánica cuántica, los dos grandes pilares de la física moderna. El universo es a la vez cuántico y relativista, y el marco que unifica estos dos cimientos recibe el nombre de teoría cuántica de campos. En los últimos cincuenta años, los físicos han logrado formular teorías cuánticas de campos para las interacciones electromagnética, fuerte y débil. El resultado se conoce como modelo estándar de la física de partículas.

Sin embargo, cuando se aplican las mismas técnicas para formular una teoría cuántica de la gravitación, enseguida surgen obstáculos que parecen insalvables. Debido a las propiedades de la gravedad, sabemos que esta ha de transmitirse por medio de una partícula sin masa, el gravitón. El problema reside en que, al calcular procesos en los que interviene el gravitón, aparecen resultados infinitos sin ningún sentido físico. Y al contrario de lo que ocurre con las demás interacciones, en este caso no disponemos de ayuda empírica de ningún tipo, ya que hoy por hoy resulta imposible efectuar experimentos donde se manifiesten a la vez los efectos cuánticos y los gravitatorios.

EL PAISAJE Y LA CIÉNAGA

Universos prohibidos

La teoría de cuerdas no predice de manera unívoca como debería ser nuestro universo. Antes bien, permite un enorme número de soluciones, cada una de las cuales describe un universo y unas leyes físicas distintas. El conjunto de soluciones válidas se conoce con el nombre de «paisaje» (*verde*). Hasta ahora, esa abundancia de posibilidades teóricas ha dificultado enormemente la tarea de extraer predicciones contrastables.

A la vista del descomunal número de universos posibles, cabría pensar que todas las teorías de partículas que pueden escribirse sobre el papel corresponden a alguna solución de la teoría de cuerdas. Sin embargo, en los últimos años varios trabajos han argumentado que no ocurre así: la gran mayoría de las teorías de partículas que pueden formularse parecen ser incompatibles con los principios de la gravedad cuántica. Tales teorías han sido bautizadas con el nombre de «ciénaga» (*rojo*).



El estudio de la ciénaga ha dado lugar a un nuevo programa de investigación con consecuencias en cosmología y en física de partículas. Una de sus propiedades más interesantes es que el modelo estándar de la física de partículas, la teoría que describe el universo que nos rodea (*amarillo*), parece encontrarse muy cerca del borde de las teorías permitidas. Ello ha dado lugar a predicciones sobre el valor de algunos parámetros del modelo estándar que aún no se conocen bien, como la masa de los neutrinos.

ILUSTRACIONES CORTESÍA DEL AUTOR, MODIFICADAS POR *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

¿De dónde surge esta dificultad para hacer experimentos? La razón principal se debe a que, comparada con las demás interacciones de la naturaleza, la gravedad es extremadamente débil. Este hecho parece ir contra nuestra experiencia cotidiana, donde el peso de los objetos desempeña un papel muy relevante. No obstante, resulta sencillo comprobar lo débil que es la gravedad. Cuando se nos cae un objeto al suelo y lo levantamos, con nuestros dedos estamos venciendo sin problemas la atracción gravitatoria debida a la masa de toda la Tierra: unos seis cuatrillones (un 6 seguido de 24 ceros) de kilogramos. Nuestros músculos funcionan por procesos químicos, que a la postre no

son más que procesos electromagnéticos. Por tanto, este ejemplo cotidiano ilustra hasta qué punto la interacción electromagnética es más intensa que la gravitatoria.

Por esa razón, cuando efectuamos experimentos con átomos o partículas elementales (es decir, experimentos capaces de observar fenómenos cuánticos), los efectos de la gravedad son inobservables, ya que quedan totalmente eclipsados por los de las demás interacciones. Para observar fenómenos gravitatorios hemos de concentrar cantidades macroscópicas de masa. Pero, en tal caso, los efectos cuánticos son inapreciables.

Es posible ver que, para detectar efectos cuánticos y gravitatorios en un experimento de física de partículas, sería necesario alcanzar energías cercanas a la escala de Planck. Esta escala de energías se define a través de la ecuación $E_P = M_P c^2$, donde c representa la velocidad de la luz y

$$M_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G_N}}$$

denota la masa de Planck. Esta fue introducida por el físico alemán Max Planck en 1899, y es la única cantidad con unidades de masa que puede obtenerse combinando las tres constantes de la naturaleza ligadas a la teoría de la relatividad (la velocidad de la luz, c), a la mecánica cuántica (la constante de Planck, $\hbar$) y a la gravedad (la constante de Newton, G_N). Por tanto, no sorprende que sea la escala que dicta el momento en que los efectos cuánticos de la gravedad se tornan importantes.

El problema reside en que dicha escala de masas (o, equivalentemente, de energías) resulta ser descomunal: del orden de diez trillones de veces mayor que la masa de un átomo de hidrógeno, o mil billones de veces mayor que la energía alcanzada en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, en Ginebra. De hecho, se ha estimado que, para lograr la escala de Planck en un acelerador de partículas, este tendría que ser de proporciones cósmicas.

Así pues, la debilidad de la interacción gravitatoria hace que en la práctica sea imposible efectuar experimentos que permitan estudiar el comportamiento cuántico de la gravedad. ¿Cómo avanzar, entonces?

EL PAISAJE Y LA CIÉNAGA

Aunque hoy seguimos sin disponer de una teoría definitiva de la gravedad cuántica, sí que existe una fuerte candidata: la teoría de cuerdas. Esta teoría, de gran complejidad matemática y enorme belleza formal, postula que todas las partículas elementales observadas en la naturaleza corresponden, en realidad, a distintos modos de vibración de ciertas «cuerdas» fundamentales: concentraciones de energía con forma de filamento y extremadamente diminutas.

Una de las principales predicciones de la teoría de cuerdas es precisamente que uno de esos modos de vibración ha de tener las mismas propiedades que el gravitón, la partícula mediadora de la gravedad. Y a diferencia de los intentos por construir una teoría cuántica de campos de la gravedad, la teoría de cuerdas no arroja resultados infinitos cuando calculamos procesos en los que interviene el gravitón. Además, en 1996, Andrew Strominger, de la Universidad de California en Santa Bárbara, y Cumrun Vafa, de Harvard, usaron la teoría de cuerdas para entender, por primera vez, el origen de la entropía de los agujeros negros, uno de los problemas más profundos y persistentes de la física fundamental [*véase* «Cómo fugarse de un agujero negro», de Steven B. Giddings; Investigación y Ciencia, febrero de 2020]. Por último, la teoría de cuerdas presenta todos los ingredientes necesarios para describir el mundo de las partículas elementales más allá de la gravedad. Y de hecho, se han encontrado soluciones de la teoría con propiedades muy cercanas a las del modelo estándar de la física de partículas. No obstante, aunque en las últimas décadas hemos ido acumulando una enorme cantidad de información sobre la teoría de cuerdas, quedan aún numerosos aspectos por entender. Uno de ellos es el relativo al gran número de soluciones que permite la teoría.

La teoría de cuerdas incluye una curiosa predicción: que el universo no tiene tres dimensiones espaciales, sino nueve. Por excéntrica que pueda parecer, la idea de que el espacio podría tener más de tres dimensiones se remonta a los años veinte del siglo pasado y, en principio, no tiene por qué ser incompatible con nuestra experiencia cotidiana. Para ver por qué, imaginemos que tales dimensiones adicionales existieran, pero que estuviesen enrolladas sobre sí mismas formando un subespacio extremadamente diminuto. En tal caso, nunca las veríamos haciendo experimentos en condiciones normales. A modo de ejemplo, pensemos en un ciempiés que recorre un finísimo hilo de nailon. Para el animal, el hilo solo tendrá una dimensión, pues solo puede moverse en él hacia delante o hacia atrás. Sin embargo, si el ciempiés fuese reduciendo progresivamente su tamaño, llegaría un momento en el que apreciaría que el hilo tiene en realidad la forma de un cilindro, por lo que, además de moverse hacia delante o hacia atrás, también podría hacerlo hacia la derecha o hacia la izquierda. De repente, a distancias lo suficientemente pequeñas, el animal comprobaría que su «universo» tiene en realidad una dimensión más.

En teoría de cuerdas la situación es similar, solo que con seis dimensiones extra. Si estas se encuentran enrolladas sobre sí mismas y su tamaño es diminuto (trillones de veces menor que el radio de un núcleo atómico, pongamos por caso), en condiciones normales serían inobservables. Sin embargo, la teoría de cuerdas no determina de manera unívoca qué forma geométrica han de tomar esas seis dimensiones extra. Permite billones y billones de posibilidades, cada una de las cuales constituye una solución válida de la teoría. Y la geometría de ese subespacio diminuto de seis dimensiones determina qué partículas e interacciones observamos a largas distancias; es decir, en las tres dimensiones restantes que sí experimentamos en nuestro día a día. Por tanto, la teoría de cuerdas permite una miríada de teorías de partículas y de gravedad en tres dimensiones.

El conjunto de todas las soluciones posibles de la teoría de cuerdas recibe el nombre de «paisaje» (*landscape*, en inglés). Al provenir de la teoría de cuerdas, todas ellas constituyen una teoría coherente de gravedad cuántica. Sin embargo, la gran mayoría tendrán un repertorio de partículas e interacciones muy distinto del que observamos.

La teoría de cuerdas tiene la propiedad de que, a distancias grandes comparadas con el tamaño de las seis dimensiones extra, la física resultante (sea esta cual sea) queda descrita por una teoría cuántica de campos. Por tanto, al haber un número tan descomunal de soluciones posibles, uno podría pensar que, aunque no representen el mundo real, todas las teorías cuánticas de campos que podemos escribir sobre el papel deberían corresponder a una solución de la teoría de cuerdas. De ser el caso, el problema de obtener predicciones contrastables se tornaría mucho más complejo.

Esta situación dio un vuelco hace unos años. En 2005, Vafa hizo notar que, contrariamente a lo que pudiera parecer, la inmensa mayoría de las teorías cuánticas de campos que podemos formular resultan incompatibles con los principios de la grave-

La pista de los agujeros negros cuánticos

Se han propuesto varios criterios para clasificar las posibles teorías físicas en función de su pertenencia o no a la ciénaga. El mejor estudiado hasta ahora es la «conjetura de la gravedad débil». Esta postula que, en cualquier teoría que respete los principios de la gravedad cuántica, la gravedad ha de ser la interacción fundamental más débil de todas.

En términos técnicos, lo anterior equivale a afirmar que ha de existir al menos una partícula que, en unidades de la masa de Planck, satisfaga que su masa m sea menor o igual que su carga eléctrica q; es decir, $m \leq q$. Este requisito lo cumplen todas las partículas observadas en la naturaleza. Pero ¿por qué tendría que ocurrir siempre así?

Agujeros negros y partículas elementales

Los argumentos que han llevado a formular dicho principio se basan en las propiedades matemáticas de los agujeros negros cuánticos. Un agujero negro puede entenderse como el resultado de concentrar una gran cantidad de masa en una pequeña región del espacio. Al hacerlo, llegará un momento en que la gravedad será tan intensa que nada, ni siquiera la luz, podrá escapar de sus inmediaciones.

No obstante, eso deja de ser cierto al incorporar los efectos de la mecánica cuántica. En 1974, Stephen Hawking descubrió que las leyes cuánticas implican que los agujeros negros sí emiten partículas. Lo hacen del mismo modo que un cuerpo caliente, por lo que resulta posible asignarles una temperatura. Dicha temperatura determina la tasa de emisión.

Otra propiedad sorprendente de los agujeros negros viene expresada por el aforismo «los agujeros negros no tienen pelo»; es decir, irregularidades o detalles de ningún tipo. Esto quiere decir que, con independencia de su proceso de formación, todos los agujeros negros quedan completamente descritos por su masa, su momento angular y por el valor de alguna carga fundamental, como la carga eléctrica. En otras palabras: de manera similar a lo que ocurre con las partículas elementales, los agujeros negros son en el fondo objetos extremadamente simples, caracterizados únicamente por su masa, espín y carga eléctrica.

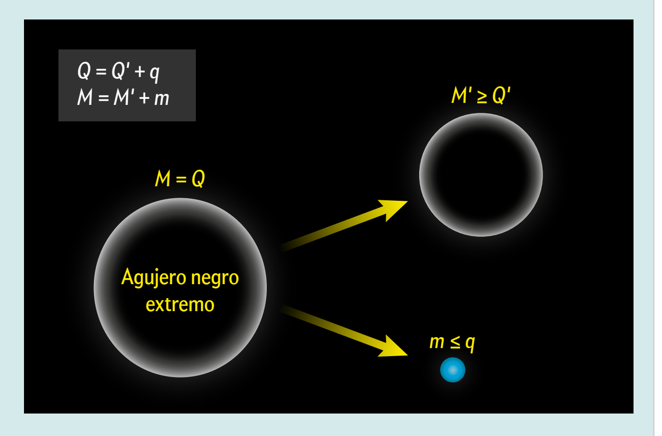
Agujeros negros extremos

Consideremos ahora un agujero negro de masa total M y carga eléctrica total Q. Un resultado muy conocido en relatividad general afirma que, para evitar la aparición de patologías en el espaciotiempo, la masa total ha de ser siempre mayor o igual que la carga total: $M \geq Q$.

Cuando $M > Q$, el agujero negro se comporta de la manera habitual y emite partículas de Hawking, por lo que su masa disminuirá paulatinamente. Este proceso continúa hasta que $M = Q$. Los agujeros negros que satisfacen esta igualdad se denominan «extremos» y exhiben una curiosa propiedad: su temperatura es cero, por lo que no pueden seguir desintegrándose emitiendo partículas de Hawking.

No obstante, si los agujeros negros extremos fueran completamente estables, existirían infinitos tipos: uno por cada valor posible de la carga Q. A todos los efectos se comportarían como partículas elementales. Y, al ser infinitas, ello daría lugar a graves problemas. Por ejemplo, los efectos cuánticos cambiarían el valor de la constante de Newton y harían que esta valiese cero, por lo que la gravedad desaparecería. Por esta razón, hace tiempo que los físicos creen que ha de existir algún mecanismo que permita la desintegración de los agujeros negros extremos.

Una posibilidad es que existan partículas cuya masa y carga satisfagan la condición $m \leq q$, ya que, en tal caso, un agujero negro extremo sí podría desintegrarse emitiendo tales partículas (algo imposible si estas no existieran; *véase la figura*). Por tanto, la inestabilidad de los agujeros negros extremos sugiere la existencia de partículas que satisfagan la conjetura de la gravedad débil.



La existencia de partículas elementales que satisfagan la conjetura de la gravedad débil permitiría que los agujeros negros extremos se desintegrasen.

Cargas globales

Antes hemos dicho que los agujeros negros quedan caracterizados por el valor de alguna carga «fundamental», como la carga eléctrica. Decimos que la carga eléctrica es fundamental porque está asociada a una interacción (el electromagnetismo) y a una partícula mediadora (el fotón). Sin embargo, no todas las cargas tienen esta propiedad. Un ejemplo es la llamada carga bariónica, la cual corresponde al número total de protones y neutrones en un núcleo. No hay ninguna interacción fundamental asociada a la carga bariónica ni ningún «fotón bariónico». Este tipo de cargas se denominan «globales».

Sin embargo, aunque un agujero negro puede haber tragado multitud de protones y neutrones durante su formación, carece de carga bariónica. Para un agujero negro, las cargas globales no existen. Por tanto, una teoría coherente de gravedad cuántica no debería permitir la existencia de cargas globales.

Pero si en gravedad cuántica no puede haber cargas globales, entonces el límite en el que la carga eléctrica q de las partículas tiende a cero ha de ser problemático. La razón es que, si q se acerca mucho a cero, el fotón deja de interaccionar con la materia, por lo que sería como si no hubiera electromagnetismo. La carga se conserva, pero la interacción asociada desaparece. Esa situación equivaldría a tener una carga global.

La relación $m \leq q$ captura este hecho, ya que, si se cumple, el límite en el que q tiende a cero obliga a la aparición de partículas sin masa. Tales partículas son de hecho infinitas, lo que de nuevo daría lugar a graves problemas de consistencia matemática.

dad cuántica y, en particular, no pueden obtenerse a partir de la teoría de cuerdas. Vafa denominó «ciénaga» (*swampland*) al conjunto de todas esas teorías de campos inviables. En los últimos cinco años, este programa de investigación ha experimentado un gran auge, ya que, según han señalado numerosos trabajos, imponer que el universo observado sea parte del paisaje de teorías —y no de la ciénaga— podría tener importantes implicaciones en cosmología y física de partículas.

LA CONJETURA DE LA GRAVEDAD DÉBIL

Un año después de introducir el concepto de ciénaga, Nima Arkani-Hamed, Luboš Motl, Alberto Nicolis y el propio Vafa, por entonces todos ellos en Harvard, elaboraron dicha idea y presentaron grandes clases de teorías de campos incompatibles con los principios de la gravedad cuántica y la teoría de cuerdas. La propuestas de estos investigadores constituye el ejemplo más sencillo donde aparece el concepto de ciénaga, y se conoce con el nombre de «conjetura de la gravedad débil».

Consideremos un universo imaginario en el que solo hubiera fotones y gravitones. En tal caso, la conjetura afirma dos cosas. Primero, que la teoría que describe dicho universo está en la ciénaga; para que sea compatible con la gravedad cuántica, la teoría debe incluir también partículas dotadas de carga eléctrica que puedan interaccionar con los fotones. En segundo lugar, la conjetura dicta que ha de existir al menos una partícula con masa m y carga q tal que, en unidades de la masa de Planck, m sea menor o igual que q:

$$\frac{m}{M_P} \leq q$$

(Para simplificar las fórmulas, a partir de ahora emplearemos las unidades usadas habitualmente en física de partículas, en las que la constante de Planck y la velocidad de la luz valen exactamente uno: $\hbar = c = 1$. En estas unidades, la carga eléctrica pasa a ser una magnitud adimensional.)

Esta condición equivale a afirmar que la atracción gravitatoria entre dos de tales partículas ha de ser menor o igual que la fuerza electromagnética. Una manera sencilla de verlo consiste en comparar la ley de la gravitación de Newton con la de Coulomb. En las unidades que estamos empleando aquí, y para

COSMOLOGÍA

La energía oscura y la ciénaga

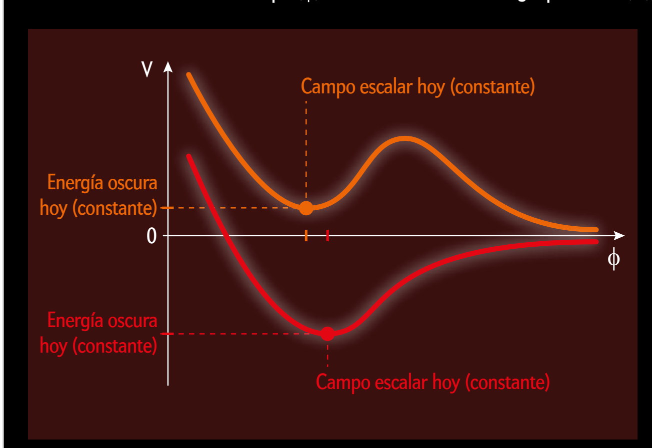
Desde finales del siglo pasado sabemos que todo el universo se halla impregnado de una densidad de energía de naturaleza desconocida. Conocida como «energía oscura», su efecto físico consiste en acelerar la expansión del cosmos. Su origen constituye una de las principales preguntas a las que se enfrenta hoy en día la física fundamental.

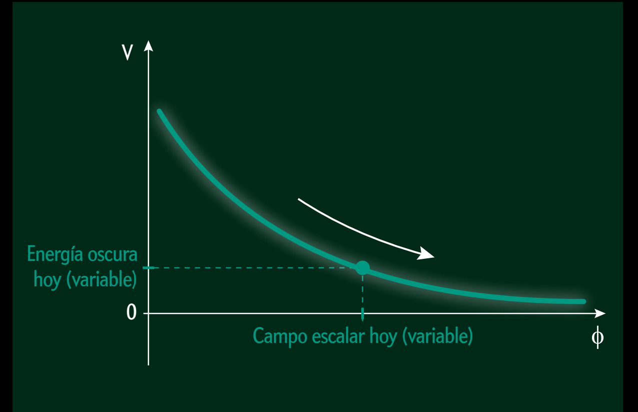
El modelo cosmológico estándar, la teoría empleada por los físicos para estudiar la evolución del universo, postula que la densidad de energía oscura corresponde a la constante cosmológica propuesta en su día por Albert Einstein. Dicha suposición implica que la densidad de energía oscura es constante no solo en el espacio, sino también en el tiempo.

En los últimos años, varios trabajos en teoría de cuerdas han argumentado que las teorías con constante cosmológica están en la ciénaga (*izquierda*); es decir, serían incompatibles con los principios de la gravedad cuántica. En tal caso, la explicación de la energía oscura debería basarse en otros modelos (*derecha*), con posibles consecuencias observables.

El origen de la energía oscura

La manera más sencilla en que puede aparecer la energía oscura es si existe un campo físico similar al campo de Higgs, que, al igual que este, llena todo el universo. Si dicho campo (ϕ) tiene asociada una energía potencial (*V*), el valor de esta correspondería a la energía oscura.





Ciénaga
Si la energía potencial presenta un mínimo, el campo evolucionará hasta alcanzar dicho valor, de manera similar a una canica que rueda por una ladera. Al llegar al mínimo permanecerá allí, por lo que el resultado será un universo con constante cosmológica. Dependiendo del valor del potencial en el mínimo, la constante cosmológica puede ser positiva (*naranja*) o negativa (*rojo*). Tales modelos no serían compatibles con la teoría de cuerdas.

Paisaje
Otra posibilidad es que la energía potencial adopte la forma de una pendiente siempre descendente. En tal caso el valor del campo no alcanzaría ningún valor estable, sino que iría aumentando progresivamente a medida que evoluciona el universo. Esta posibilidad teórica se conoce como «quintaesencia» y sus consecuencias observacionales serían distintas de las que implica una constante cosmológica.

dos partículas de masa m y carga q separadas una distancia d, las expresiones para la fuerza gravitatoria y electrostática adoptan respectivamente la forma

$$F_N = G_N \frac{m^2}{d^2} \,,$$

$$F_C = \frac{q^2}{d^2} \,.$$

Si ahora tenemos en cuenta que la constante de Newton G_N es inversamente proporcional a la masa de Planck al cuadrado, resulta inmediato ver que la condición de que la masa sea menor o igual que la carga equivale a

$$F_N \leq F_C \,.$$

Como señalábamos al principio, en nuestro universo se cumple claramente que la gravedad es la interacción fundamental más débil de todas. Y de hecho, la relación mencionada entre masa y carga la satisfacen con holgura todas las partículas con carga eléctrica observadas en la naturaleza. Para el electrón, por ejemplo,

$$\frac{m_e}{M_P} \approx 10^{-21} \,,$$

$$q_e \approx 0{,}1 \,.$$

Las razones para proponer esta conjetura guardan relación con varias propiedades generales de la teoría de cuerdas, así como con ciertas expectativas teóricas sobre el comportamiento de los agujeros negros (*véase el recuadro* «La pista de los agujeros negros cuánticos»). Hoy contamos con numerosos indicios de que la conjetura es cierta. Desde que Vafa y sus colaboradores la propusieran, multitud de trabajos han comprobado que, en todas las teorías que pueden obtenerse como límite de la teoría de cuerdas, esta condición nunca se viola.

LA CIÉNAGA Y EL UNIVERSO

La conjetura de la gravedad débil nos da un criterio sencillo para enviar a la ciénaga toda una variedad de teorías cuánticas de campos. En los últimos años, este programa de investigación se ha ampliado con nuevos criterios para identificar otras teorías que, aunque posibles en principio, también estarían en la ciénaga; es decir, resultarían incompatibles con los principios de la gravedad cuántica y la teoría de cuerdas. Uno de ellos, propuesto en 2018 por Vafa junto con Georges Obied, también de Harvard, e Hirosi Ooguri y Lev Spodyneiko, del Instituto de Tecnología de California, ha recibido gran atención en los últimos años, ya que hace referencia directa a las propiedades de la energía oscura.

Para entender su propuesta, hemos de explicar primero cómo puede surgir una densidad de energía que impregne todo el espacio, tal y como parece ocurrir con la energía oscura. La manera más sencilla de obtener dicho resultado pasa por suponer que hay un campo de energía que llena el universo. Dicho campo sería de tipo «escalar» (es decir, similar al campo de Higgs, cuya partícula correspondiente fue descubierta en 2012 en el LHC) y tendría asociada una energía potencial. En tal caso, la energía oscura simplemente vendría dada por el valor de la energía potencial de dicho campo.

La pregunta relevante es qué mecanismo dicta el valor de esa energía potencial. Todos los sistemas físicos evolucionan de manera natural hacia los estados de menor energía. Por tanto, si la gráfica que representa la energía potencial del campo escalar posee un mínimo (es decir, una región con forma de valle), el campo habría alcanzado de manera natural dicho mínimo y habría quedado «congelado» ahí. Ello daría lugar a una densidad de energía oscura constante no solo en el espacio, sino también en el tiempo.

Por razones históricas, una energía oscura constante en el espacio y en el tiempo se conoce también con el nombre de «constante cosmológica», un parámetro propuesto por Einstein para completar sus ecuaciones del campo gravitatorio y que durante décadas los físicos pensaron que valía exactamente cero. Ese es precisamente uno de los postulados del modelo cosmológico estándar, la teoría empleada hoy en día para describir la evolución del universo. Según dicho modelo, la densidad de energía oscura que muestran las observaciones corresponde a la constante cosmológica postulada en su día por Einstein, la cual tendría un valor diminuto y signo positivo.

Sin embargo, la propuesta de Vafa, Obied, Ooguri y Spodyneiko establece algo sorprendente: que las teorías con una constante cosmológica positiva están en la ciénaga; es decir, no serían compatibles con la gravedad cuántica. La razón principal para postular este principio es que, tras varias décadas intentando obtener una solución de la teoría de cuerdas que arroje una constante cosmológica positiva, no se ha conseguido encontrar ningún ejemplo concreto. (Aunque es cierto que existen algunas propuestas, estas son considerablemente complejas y en la actualidad su validez se halla bajo severo escrutinio.)

A pesar de estar menos fundamentada que la conjetura de la gravedad débil, esta nueva conjetura de la ciénaga ha sido profusamente estudiada durante los últimos tres años, ya que, de ser cierta, tendría un enorme impacto en nuestra comprensión del universo. A primera vista, la conjetura parece contradecir el hecho experimental de que existe una densidad de energía positiva que llena todo el cosmos. Sin embargo, lo que realmente afirma es que dicha densidad de energía no puede corresponder a una constante cosmológica; es decir, a un valle en el potencial del campo escalar que mencionábamos con anterioridad.

No obstante, existe otra posibilidad que sigue siendo compatible con las observaciones: que el potencial del campo escalar no tenga ningún mínimo, sino que presente la forma de una ladera siempre descendente. En tal caso, a medida que evoluciona el universo, el valor del campo iría cambiando y su energía potencial iría disminuyendo progresivamente, del mismo modo que una canica que rueda por una pendiente infinita. Esta posibilidad ya había sido considerada de manera independiente en el pasado y recibe el nombre de «quintaesencia». Lleva a consecuencias observacionales distintas de las que implica una constante cosmológica, y varios experimentos en curso o proyectados deberían poder distinguir entre una y otra en el futuro.

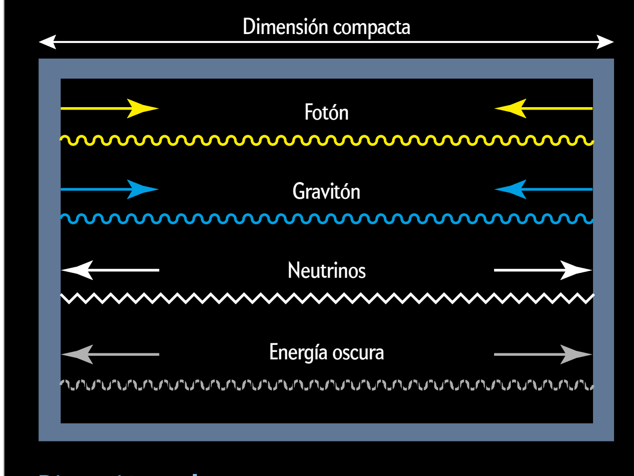
Esta nueva conjetura de la ciénaga resulta controvertida, pues la imposibilidad de tener una constante cosmológica positiva no solo va contra los postulados del modelo cosmológico estándar, sino también contra las versiones más sencillas de la teoría de la inflación cósmica, la idea de que, durante la primera fracción de segundo, el universo experimentó un período de expansión exponencial. En la actualidad, varios investigadores están realizando un gran esfuerzo teórico para dilucidar si esta conjetura puede ser confirmada, ya que, en tal caso, sus implicaciones cosmológicas serían de primer orden.

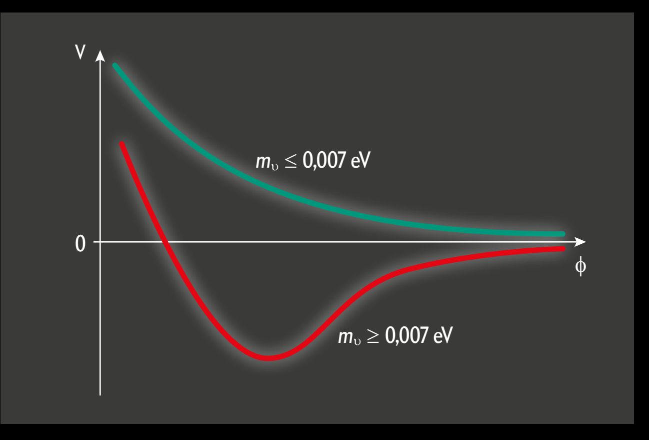
DEL UNIVERSO A LA FÍSICA DE PARTÍCULAS

Por último, existe una extensión de la conjetura de la gravedad débil que encierra también implicaciones cosmológicas. En 2016, Ooguri y Vafa argumentaron que, si la fuerza de la gravedad fuese estrictamente menor (en vez de menor o igual) que las

La masa de los neutrinos y la energía oscura

El estudio de las teorías incompatibles con la teoría de cuerdas ha permitido establecer algunas predicciones sobre algunos parámetros aún desconocidos del modelo estándar. Para ello, los físicos consideran qué ocurriría si una de las tres dimensiones del espacio se encontrase enrollada sobre sí misma (*izquierda*). Dado que el modelo estándar es una teoría válida, la teoría bidimensional resultante debería pertenecer al paisaje de teorías permitidas, no a la ciénaga. Sin embargo, esta propiedad no se cumple si la masa del neutrino más ligero supera cierto umbral, lo que implica una cota para la masa de esta partícula (*derecha*).





Dimensión oculta

Una dimensión «compacta», o enrollada sobre sí misma, genera la aparición de un campo escalar. El valor de dicho campo determina el tamaño de la dimensión enrollada, el cual viene dado por un balance entre cuatro fuerzas: la fuerza atractiva debida a fotones y gravitones, y la repulsión generada por los neutrinos y por la energía oscura. Como resultado, dicho balance de fuerzas genera un potencial para el campo escalar (*derecha*).

Potencial escalar

Si la masa del neutrino más ligero (m_ν) es mayor que la escala de energías asociada a la densidad de energía oscura, el potencial (V) asociado al campo escalar (ϕ) presenta un mínimo de energía negativa (*rojo*). Tales teorías parecen pertenecer a la ciénaga, por lo que estarían prohibidas por la teoría de cuerdas. Ello implica una predicción para el valor, aún desconocido, de la masa del neutrino más ligero: esta no puede superar las milésimas de electronvoltio (eV), una cota compatible con los límites experimentales.

demás interacciones, entonces tampoco podría haber soluciones de la teoría de cuerdas con constante cosmológica negativa, o que, en caso de existir, estas serían inestables.

Dicha extensión reviste una gran importancia teórica, ya que, al contrario de lo que ocurre en el caso de una constante cosmológica positiva, en teoría de cuerdas resulta muy sencillo obtener soluciones con constante cosmológica negativa, lo que permite verificar el estatus de la conjetura. Y de hecho, hasta ahora se ha comprobado que todas las soluciones de teoría de cuerdas con constante cosmológica negativa son inestables. (Hay que añadir, para los expertos, que la conjetura permite una excepción: aquellas soluciones con constante cosmológica negativa que, además, presentan una propiedad conocida como supersimetría. No obstante, tales soluciones no son relevantes para describir el universo observado y no las consideraremos aquí.)

En un trabajo reciente realizado junto con Víctor Martín-Lozano, de la Universidad de Bonn, e Irene Valenzuela, actualmente en Harvard, hemos desarrollado una aplicación de esta última conjetura con implicaciones en física de partículas. En concreto, una predicción sobre la masa de los neutrinos en función del valor observado de la densidad de energía oscura.

La idea general parte de la base de que, si tenemos una teoría compatible con la gravedad cuántica, las teorías que obtengamos a partir de ella imponiendo que una de las dimensiones del espacio esté enrollada sobre sí misma también deberían ser válidas. A partir de aquí, podemos aplicar este principio al modelo estándar de la física de partículas y analizar qué ocurriría si una de las tres dimensiones de nuestro universo estuviese enrollada formando una circunferencia de tamaño diminuto.

Cuando una de las dimensiones del espacio es finita, o «compacta», aparece siempre un campo escalar como los mencionados anteriormente. De hecho, es el valor de este campo el que determina el tamaño de la dimensión enrollada. Ahora bien, ¿tiene dicho campo una energía potencial asociada? En otras palabras, ¿hay algún mecanismo que fije su valor?

Cuando tenemos en cuenta los efectos de la mecánica cuántica, la respuesta es afirmativa. El tamaño de la dimensión enrollada depende de los campos cuánticos que circulan en su interior. Dicho problema es similar al que aparece en el efecto Casimir: la fuerza de atracción mutua que experimentan dos placas conductoras debido a los fotones virtuales del vacío cuántico [*véase* «El efecto Casimir», por Emilio Elizalde; Investigación y Ciencia, marzo de 2009]. Este efecto fue predicho en 1948 por el físico holandés Hendrik Casimir y, desde entonces, ha sido verificado numerosas veces en el laboratorio. La única diferencia con el caso considerado aquí es que, en vez de tratarse de la fuerza generada entre dos placas conductoras, se trata de analizar la fuerza que aparece en un espacio compacto circular.

A bajas energías, las partículas que contribuyen a determinar el tamaño de la dimensión enrollada son las de menor masa: el fotón, el gravitón y los neutrinos. Al igual que ocurre en el efecto Casimir, los dos primeros generan una fuerza atractiva; es decir, tienden a contraer el tamaño de la dimensión enrollada. Ello se debe a que son bosones. Los neutrinos, sin embargo, son

fermiones, por lo que dan lugar a una fuerza repulsiva, la cual tiende a aumentar el tamaño de la dimensión compacta. Por último, a esta fuerza repulsiva se suma el efecto de la energía oscura, la cual sigue presente en el modelo.

Es el balance entre tales fuerzas de distinto signo el que da lugar a un potencial para el campo escalar asociado a la dimensión enrollada. Sin embargo, la forma exacta de dicho potencial depende de un parámetro del modelo estándar hasta ahora desconocido: la masa del neutrino más ligero. Sabemos que existen tres tipos de neutrinos y que la masa de todos ellos es diminuta (del orden de millones de veces menor que la del electrón, la siguiente partícula más ligera). Sin embargo, desconocemos los valores precisos de sus masas.

Si la masa del neutrino más ligero fuera exactamente nula, la fuerza neta que determina el tamaño de la dimensión compacta sería siempre repulsiva, por lo que no se generaría ningún mínimo en el potencial asociado. Pero, si su masa aumenta, llega un momento en el que aparece un mínimo donde la energía potencial es negativa: justo lo que prohíbe una de las conjeturas de la ciénaga. ¿Cuándo ocurre esto?

Curiosamente, para que dicho potencial «prohibido» no aparezca, la masa m_ν del neutrino más ligero debe satisfacer

$$(m_\nu)^4 \leq \rho_{EO} \; ;$$

es decir, ha de ser menor que la densidad de energía asociada a la energía oscura (en las unidades que estamos empleando aquí, donde $\hbar = c = 1$, masa y energía tienen las mismas unidades y una densidad de energía tiene dimensiones de masa a la cuarta). Expresada en electronvoltios (eV), esta condición se traduce en

$$(m_\nu)^4 \leq \rho_{EO} \approx (0{,}0024 \text{ eV})^4 ,$$

una desigualdad perfectamente compatible con los límites experimentales actuales.

Hasta ahora, el hecho de que la masa de los neutrinos fuera tan próxima a la escala de energías asociada a la densidad de energía oscura era algo que carecía de explicación, ya que nada hacía pensar que la física de uno y otro fenómeno pudieran estar relacionadas. Sin embargo, en el marco de la teoría de cuerdas y las conjeturas de la ciénaga, esta aparente coincidencia encuentra una explicación natural. Varios experimentos de cosmología y física de partículas deberían poder verificar esta predicción en el futuro.

Un cálculo más detallado revela que la masa del neutrino más ligero debería de ser inferior a los 0,007 eV. Algunos análisis de observaciones cosmológicas recientes ya han indicado que la masa de este neutrino no puede superar los 0,037 eV, tan solo un factor cinco por encima del límite predicho por los argumentos de la ciénaga. A lo largo de los próximos diez años, es posible que las observaciones cosmológicas logren obtener cotas más estrictas y confirmen dicha predicción. Si, por el contrario, la masa del neutrino más ligero resultase ser mayor de 0,007 eV, entonces los argumentos de la ciénaga serían incorrectos, o bien tendrían que existir nuevas partículas ultraligeras capaces de modificar el potencial escalar y eliminar la existencia de un mínimo.

REPENSAR LA NATURALIDAD

Por otro lado, estos argumentos proporcionan una nueva manera de entender uno de los problemas más acuciantes de la física fundamental: el llamado problema de la «naturalidad» de las masas de las partículas del modelo estándar. En síntesis, este rompecabezas se reduce a entender por qué la masa de la partícula de Higgs es miles de billones de veces menor que la otra escala fundamental de masas de la física: la masa de Planck. Esta pregunta surge porque, según todos los cálculos, los efectos cuánticos deberían hacer que la masa del bosón de Higgs aumentase hasta valores próximos a la escala de Planck. Además, dado que el campo de Higgs es el responsable de dotar de masa a las demás partículas elementales, lo anterior se traduce en que, a la postre, todas las partículas tendrían que tener una masa relativamente cercana a la de Planck. Y si también los neutrinos adquieren masa por el mecanismo de Higgs, el mismo razonamiento se aplicaría a ellos, por lo que su masa debería ser asimismo enorme. ¿Por qué no ocurre así?

La respuesta podría estar en la propia gravedad cuántica. Recordemos que los argumentos de la ciénaga imponen que la masa de los neutrinos ha de ser extremadamente pequeña. Por tanto, aquellas situaciones físicas en que la masa de la partícula de Higgs se hace enorme han de estar también en la ciénaga, ya que una gran masa para el bosón de Higgs conlleva una gran masa para los neutrinos. Así pues, en este sentido no habría ningún problema de naturalidad: si nos ceñimos a teorías de partículas que sean compatibles con la gravedad cuántica, la posibilidad de que el bosón de Higgs adquiera una masa cercana a la de Planck simplemente no existe.

Este último argumento aporta un ejemplo claro de cómo exigir que nuestras teorías sean compatibles con la gravedad cuántica puede tener implicaciones sobre el valor de las constantes físicas que observamos en la naturaleza: no todos los valores son posibles si en dichas teorías incluimos los efectos de la gravedad. Y el supuesto problema de que tales valores se alejen de los que consideraríamos «naturales» podría no ser más que un espejismo causado por nuestro conocimiento incompleto de qué teorías pertenecen a la ciénaga.

Como hemos visto, las ideas que permiten extraer estas conclusiones aparecen como una consecuencia de exigir que la gravedad sea la más débil de todas las interacciones fundamentales. Aún no entendemos por completo por qué debería ser así. ¿Nos hallamos ante un nuevo principio general de la naturaleza?

PARA SABER MÁS

The string landscape and the swampland. Cumrun Vafa en **arxiv.org/abs/hep-th/0509212**, octubre de 2005.

The string landscape, black holes and gravity as the weakest force. Nima Arkani-Hamed et al. en *Journal of High Energy Physics*, vol. 2007, art. 060, junio de 2007.

Constraining neutrino masses, the cosmological constant and BSM physics from the weak gravity conjecture. Luis E. Ibáñez, Víctor Martín-Lozano e Irene Valenzuela en *Journal of High Energy Physics*, vol 2017, art. 66, noviembre de 2017.

De Sitter space and the swampland. Georges Obied et al. en **arxiv.org/abs/1806.08362**, julio de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

El universo y su quintaesencia. Jeremiah P. Ostriker y Paul J. Steinhardt en *IyC*, marzo de 2001.

El paisaje de la teoría de cuerdas. Raphael Bousso y Joseph Polchinski en *IyC*, noviembre de 2004.

El rompecabezas de la energía oscura. Adam G. Riess y Mario Livio en *IyC*, mayo de 2016.

GENÉTICA MÉDICA

Nuevos fármacos contra las enfermedades minoritarias

Descartados desde hace tiempo, los oligonucleótidos antisentido comienzan a dar frutos espectaculares en trastornos neurológicos

Lydia Denworth

Fotografías de Ethan Hill

EMMA LARSON, una de las primeras niñas que se ha beneficiado de un fármaco de tipo antisentido, posa en su casa de Long Island, Nueva York.


rifton

Lydia Denworth es periodista científica. Ha escrito artículos y libros sobre temas diversos, en especial sobre neurociencia y comportamiento social.



Como tantos otros bebés a su edad, cuando Emma Larson cumplió un año no caminaba ni se mantenía de pie. Gateaba sin parar y le encantaba el saltador que le habían instalado en su casa de Long Island, Nueva York. Pero a los 13 meses, las piernas dejaron de responderle. Su madre, Dianne, lo recuerda como si fuera hoy. Emma dejó de saltar y las piernas se le doblaban cuando se incorporaba. El cambio fue sutil, pero los vídeos domésticos grabados meses antes hacían patente la diferencia: ahora gateaba menos distancia y mantenía la cabeza erguida con dificultad.

Después de incontables pruebas, en julio de 2014 supieron que padecía atrofia muscular espinal (AME), una grave enfermedad neurodegenerativa que afecta sobre todo a los niños e impide caminar, hablar y, en el peor de los casos, respirar. Las neuronas motoras del cuerpo mueren progresivamente por la escasez de una proteína: la SMN o proteína de supervivencia de las motoneuronas. «Te sumes en la más negra de las oscuridades», relata Dianne. El padre, Matt, añade: «Estábamos dispuestos a hacer lo indecible para combatir esta enfermedad atroz».

No lejos del hogar de los Larson, en el laboratorio de Cold Spring Harbor, el bioquímico y genético molecular Adrian Krainer andaba enfrascado en la misma lucha. Llevaba investigando los fundamentos genéticos de la AME desde el año 2000 y sabía que el problema reside en la ausencia o la mutación de un gen esencial: el *SMN1*. También sabía que contamos con un análogo inactivo de este, el gen *SMN2,* que tal vez sería reactivable. Allá por 2004, unió sus fuerzas a las de Frank Bennett, de Ionis Pharmaceuticals, en busca de un fármaco que modificase el *SMN2*, de modo que la síntesis de la proteína SMN se reanudara con normalidad y frenase la progresión de la AME. Con ese objetivo en mente, fijaron su atención en los llamados oligonucleótidos antisentido (OAS).

Concebidos hace más de 40 años como cadenas cortas de ADN o ARN químicamente modificado (*oligo* en griego significa «poco», y los nucleótidos son las unidades estructurales que forman el ADN y el ARN), los OAS se diseñaron para adosarse a las hebras de ARN sintetizadas por el gen defectuoso y alterar su expresión. Esto es, se fijan a un tramo del ARN al cual reconocen específicamente, de modo que en unos casos facilitan la producción de la proteína funcional y en otros anulan la de la proteína anómala, causas últimas de ciertos trastornos. Hacía décadas que se intentaba demostrar que esa era una estrategia válida para obtener un fármaco preventivo o terapéutico, pero eran tantos los problemas de toxicidad y administración surgidos que muchos acabaron tirando la toalla. Los pocos que no han cejado en el empeño han conseguido superar los obstáculos a tiempo para sacar provecho de los conocimientos que la revolución genómica ha sacado a la luz sobre las enfermedades genéticas. «El tratamiento con los oligonucleótidos antisentido está diseñado a medida para las enfermedades de origen genético», explica Brett Monia, sucesor en el cargo de Stanley Crooke, fundador y exdirector general de Ionis. «Es el epítome de la medicina de precisión.»

Krainer, Bennett y sus colaboradores denominaron «nusinersen» al fármaco contra la AME que, inyectado en el líquido cefalorraquídeo, consigue que el gen inactivo de las motoneuronas fabrique la proteína SMN. Junto a Biogen, iniciaron los ensayos clínicos con seres humanos en 2011. Los Larson consiguieron que

EN SÍNTESIS

Los oligonucleótidos antisentido son cadenas cortas de ADN o ARN que han sido concebidas para unirse a determinados fragmentos de ARN y reparar así la síntesis de proteínas defectuosas que dan lugar a enfermedades.

Tras décadas de trabajo, estas moléculas sintéticas han acabado por mostrar todo su potencial.

Resultan particularmente eficaces contra trastornos neurológicos minoritarios de origen genético, entre ellos la atrofia muscular espinal o la esclerosis lateral amiotrófica.

Emma participase desde el mismo día en que pudo ser admitida: en su segundo aniversario, cuando ya no podía gatear. A la primera dosis, administrada en marzo de 2015, le siguieron en poco tiempo dos más.

En mayo de ese año, Dianne estaba en su dormitorio mientras Emma permanecía en el cuarto de estar próximo. Recuerda que oyó su voz llamándola, cada vez más cercana, por lo que pensó que tenía que venir gateando. Como no creía lo que veían sus ojos, tomó a la niña en brazos, la llevó hasta el comedor y regresó al dormitorio para llamarla: «Emma, ven aquí». La pequeña gateó hasta ella. Entre lágrimas, supo que aquel era un gran avance.

No le faltaba razón. El ensayo clínico del nusinersen tuvo tal éxito que concluyó un año antes de lo previsto. La Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de Estados Unidos (FDA) autorizó su venta con el nombre comercial de Spinraza® en diciembre de 2016. En este momento, más de 8400 pacientes lo están tomando en 40 países. A 25 recién nacidos portadores de la mutación más grave de la AME se les administró al nacer y han cumplido los 4 años con un desarrollo normal. Crooke nos confesó que se sentía más que satisfecho por haberlo desarrollado.

Spinraza parece dar la razón a quienes creen que los OAS están alcanzado por fin todo su potencial. Se trata del primer fármaco de su tipo que puede presumir de resultados espectaculares y de éxito comercial. A Krainer y Bennett les ha valido el multimillonario Breakthrough Prize de 2019. También ha puesto a tiro un tentador conjunto de dianas neurológicas, como las de la enfermedad de Huntington y la esclerosis lateral amiotrófica (ELA). «Descubrimos la base genética de muchas de estas enfermedades en los noventa, pero hemos tardado un cuarto de siglo en convertir estos descubrimientos importantes en posibles tratamientos. Nos sentimos orgullosos [de Spinraza] cuando caímos en la cuenta de que podía cambiar la vida de pacientes desahuciados», comenta Bennett.



DIANNE Y MATT LARSON con su hija, de siete años. «¡Esto es algo grande!», gritó Dianne en 2015 cuando Emma, que padece atrofia muscular espinal, llegó a ella gateando pocos meses después de iniciar el tratamiento con nusinersen, un fármaco de tipo antisentido comercializado con el nombre de Spinraza®.

Como los corredores de fondo que entrenan a gran altura, los investigadores dedicados a los oligonucleótidos antisentido han recorrido un largo camino para optimizar la química y la administración. En la actualidad se puede decir que ya compiten como velocistas a nivel del mar. Más de cien se encuentran en desarrollo para tratar desde el alzhéimer hasta la hipertensión. No todos llegarán a la meta, pero en Estados Unidos y Europa se han aprobado hasta ahora ocho, incluido Spinraza, todos para enfermedades minoritarias. Los destinados a la enfermedad de Huntington y la ELA se encuentran en la última fase de los ensayos clínicos. Y por primera vez en la historia, un médico del Hospital Infantil de Boston ha creado en menos de un año un fármaco de tipo antisentido a medida para una chiquilla afectada por una enfermedad ultraminoritaria. «La gente lleva más de 30 años hablando de bioterapias y lo extraordinario es que ya las tenemos aquí», nos comenta el neurólogo Robert Brown de la Facultad de Medicina de la Universidad de Massachusetts, pionero en la investigación sobre la ELA. «Estamos en un verdadero punto de inflexión.»

SENTIDO Y ANTISENTIDO

El ADN proporciona los planos básicos para la vida, pero hay que interpretarlos y materializarlos a través de la síntesis de proteínas, que son las verdaderas artífices de los procesos vitales. Dado que las instrucciones codificadas en el ADN son tan decisivas, el proceso de traducción incorpora mecanismos de salvaguarda. Hay mucha redundancia, empezando por las dos hebras de nucleótidos que se engranan como los dientes de una cremallera para formar la doble hélice del ADN. Una sirve de plantilla gracias a la concatenación de las cuatro bases que integran la molécula de ADN: adenina (A), timina (T), guanina (G) y citosina (C). La otra hebra lee esa plantilla y alinea un conjunto complementario de bases. Cada base de una hebra permanece siempre colocada frente a su pareja específica: A siempre se empareja con T, y C con G. Para garantizar la exactitud de las proteínas sintetizadas, el ARN solo codifica las instrucciones



EMMA SE COLUMPIA CERCA DE CASA. Gracias al éxito de los ensayos clínicos del nusinersen en los que participó con otros niños, hoy en día lo toman más de 8400 pacientes con AME en todo el mundo. Este gran avance ha impulsado el campo del tratamiento con los oligonucleótidos antisentido, que parece particularmente eficaz contra los trastornos neurológicos de origen genético.

de la hebra complementaria a la plantilla. Los biólogos usan diferentes apelaciones para las dos hebras, como «sentido» y «antisentido» (que otorgan el nombre a la técnica basada en los OAS).

De vez en cuando la fabricación del producto final, la proteína, sufre defectos que provocan su acumulación en exceso o la nula producción, lo que desata la enfermedad. Las moléculas farmacológicas de pequeño tamaño, que constituyen la mayoría de los medicamentos del mercado, actúan selectivamente sobre las proteínas anómalas. Los anticuerpos monoclonales, el otro grupo importante de fármacos, suelen fijarse a las proteínas y estimulan el sistema inmunitario del paciente para que las combata. Por el contrario, el objetivo de los fármacos de tipo antisentido es interrumpir el proceso en una etapa previa. Están diseñados para reparar el ARN defectuoso durante la transcripción encajándose en el sitio correcto de acuerdo con las reglas de emparejamiento de las bases, con lo que reconducen la síntesis de la proteína.

Una línea de investigación paralela se ha centrado en la interferencia por ARN (iARN). Este enfoque se descubrió justo cuando los antisentidos se hallaban en una vía muerta y, en tales circunstancias, quienes lo concibieron eludieron dicho término, pese al vínculo que une ambos. Para Bennet, «el antisentido sería el género y la iARN la especie». La diferencia es que los fármacos basados en la iARN son bicatenarios mientras que los OAS poseen una sola cadena (se considera oligonucleótido cualquier cadena de menos de 15 a 20 nucleótidos).

La versatilidad de los oligonucleótidos farmacológicos reside en el modo en que separan los dos elementos críticos: por un lado, la plataforma o las propiedades moleculares que determinan la administración y la distribución en los tejidos; por el otro, la secuencia de bases necesaria para que actúen selectivamente sobre un gen concreto. La modificación de la secuencia hace que la información contenida en el oligonucleótido varíe, pero los fármacos de tipo antisentido que incorporan las mismas modificaciones químicas tienden a comportarse del mismo modo en el organismo. Según Jonathan Watts, químico de ácidos nucleicos en la Facultad de Medicina de la Universidad de Massachusetts: «Esto nos permite proceder con rapidez una vez que se confirma la plataforma con la que se administrará a un tejido de interés. Pero si reordenamos la secuencia de bases teniendo en cuenta la información aportada por la secuenciación del genoma de un paciente con una enfermedad minoritaria o por las bases de datos genómicas, acabaremos en una diana totalmente distinta. Su tremenda potencia depende de nuestra capacidad para usar esa información de manera intuitiva y racional».

UNA CARRERA DE FONDO

La idea de elaborar un fármaco a partir de la información genética que se fijara al ARN circulaba desde 1978, pero había muchísimas preguntas sin respuesta: ¿cómo convertir un oligonucleótido en un fármaco? o ¿por qué ha de surtir efecto la fijación al ARN? La idea era tan intrigante para Crooke que en 1989 abandonó su cargo de jefe de investigación en SmithKline (hoy GlaxoSmithKline) para fundar una empresa dedicada al desarrollo de oligonucleótidos antisentido. Se le unieron su esposa Rosanne, también farmacóloga, y otros colaboradores, como Bennett y Monia. Llamada inicialmente Isis, por razones obvias acabó adoptando el nombre de Ionis Pharmaceuticals.

Otro puñado de empresas comenzaron a perseguir ese objetivo al mismo tiempo, pero una tras otra la mayoría acabó por abandonar. Los problemas de toxicidad, los efectos secundarios y la falta de potencia parecían insalvables.

Crooke y sus colaboradores superaron con tenacidad los escollos uno a uno. Así lo atestigua un muro empapelado de patentes en la sede de Ionis, cerca de San Diego. Primero hubo que desarrollar la química necesaria. Por ejemplo, la modificación de una posición clave (2') de la molécula de ribosa en el ARN y el ADN de los OAS mejoró su afinidad por los ARN receptores, lo que redujo notablemente la dosis necesaria. Otras modificaciones químicas mejoraron la seguridad y la tolerabilidad. Los científicos de Ionis también comprobaron que los tejidos no los captaban si se administraban directamente a las células en cultivo, pero dieron el salto al ensayo con animales de todas formas. Monia, que dirigía el departamento de desarrollo de fármacos, recuerda como si fuera ayer el momento en que la prueba química con la que estaba midiendo la cantidad de un ARN concreto le indicó que casi no quedaban restos: el fármaco había entrado en las células de la mayoría de los tejidos y había anulado la expresión del ARN en cuestión.

El tiempo que dedicaron al cáncer no fue tan fructífero, confiesa Bennett, aunque tienen en marcha experimentos prometedores, diseñados con suma meticulosidad. Lo que funcionaba eran los fármacos contra dianas específicas, por lo general de enfermedades minoritarias, para los que era fácil montar un estudio preliminar de viabilidad. Los primeros OAS se diseñaron para enfermedades oculares y, más tarde, hepáticas, donde la captación funciona particularmente bien. Resultaron eficaces, pero no superaron la fase de proyecto porque surgieron soluciones mejores.

Los fármacos oligonucleotídicos más recientes están diseñados para luchar contra las enfermedades minoritarias. Uno es Exondys 51®, que actúa sobre la distrofia muscular de Duchenne, un trastorno degenerativo progresivo y grave ocasionado por mutaciones en el gen productor de la proteína distrofina. Annemieke Aartsma-Rus, del Centro Médico Hospitalario asociado a la Universidad de Leiden, en los Países Bajos, a la sazón presidente de la Sociedad para Tratamientos con Oligonucleótidos, es experta en Duchenne y colaboró en el desarrollo. Ha sido menos espectacular que Spinraza, pero ante la solidez de los primeros resultados que demostraban el aumento de la cantidad de distrofina, se aceleró su autorización. La empresa comercializadora (de la que Aartsma-Rus es inversora) tendrá que demostrar en 2021 que el fármaco supone una diferencia significativa para el paciente.

El primer fármaco basado en la iARN, Onpattro®, fabricado por la biotecnológica Alnylam Pharmaceuticals, afincada en Boston, fue autorizado en 2018 para el tratamiento de una forma hereditaria de daño nervioso. Otro fármaco autorizado de tipo OAS de Ionis, Tegsedi®, trata el mismo problema. Todos los tratamientos a base de oligonucleótidos se centran ahora en administrar más fármaco de manera más productiva a más partes del organismo. «Muchos que andaban expectantes, a ver qué pasaba, se están dando cuenta de que si no dan el primer paso, perderán el tren», comenta Aartsma-Rus.

ESPERANZA PARA EL CEREBRO

Los diseñadores de oligonucleótidos antisentido han ignorado durante mucho tiempo buena parte de las dianas neurológicas porque estos no suelen atravesar la barrera hematoencefálica. Pero Bennett pensaba que la punción lumbar permitiría introducirlos directamente en el líquido cefalorraquídeo e insistió a un Crooke escéptico para que le dejara probar. Según el propio Crooke, «tenía muchas reservas, pero la idea es decir que sí. Un "no" nunca hubiera dado lugar a un fármaco y nunca hace mejor a nadie». Así que emprendieron los estudios exploratorios con un modelo murino de la enfermedad de Huntington, una buena candidata para los OAS por estar ligada directamente a una mutación específica. Quienes la padecen son portadores de una secuencia repetida del triplete de bases CAG, que provoca la acumulación de la proteína hungtingtina y esta, a su vez, la destrucción progresiva de las células cerebrales. Bennett y sus colaboradores averiguaron que era posible reducir la concentración de la proteína mutante en los ratones y que estos mejoraban.

Mientras tanto, Krainer se dedicaba a la AME. Otros habían descubierto que las personas sanas poseen dos versiones del gen crítico para las motoneuronas, *SMN1* y *SMN2*, pero que la segunda fabrica poca proteína SMN funcional. En los enfermos de AME el gen *SMN1* está alterado y el *SMN2* no puede suplir a este por sí solo. El ADN contiene tramos con «exones», las secuencias codificantes que se expresan (de ahí el *ex* en su nombre), y con «intrones», los tramos no codificantes que separan los exones. Un proceso de corte y empalme del ARN (*splicing*) retira los intrones y une los exones. El gen *SMN2* pierde un pedazo codificante, el exón 7, una pérdida que lo deja inactivado. Krainer y Bennett sospechaban que un OAS podría reinsertar las instrucciones perdidas de ese fragmento. Hacia 2008 habían demostrado en los ratones que el OAS que habían creado reparaba el defecto. Le siguieron los ensayos clínicos con seres humanos.

«A esto se le llama tratamiento modificador de la enfermedad», nos cuenta Krainer sobre Spinraza. «No se limita a actuar sobre algunos síntomas, sino que ataca la raíz de la enfermedad y altera su curso.» Intervenir cuanto antes es esencial: una persona con síntomas, como Emma Larson, ya ha perdido irremisiblemente una parte de las motoneuronas. El tratamiento impide que mueran más y mejora la motricidad. El éxito en los lactantes ha impulsado la detección selectiva de la AME en los recién nacidos de 16 estados del país. «Cuanto antes dé comienzo el tratamiento tras el parto o la aparición de la enfermedad, mejor», afirma.

En contra de las expectativas, Spinraza ha demostrado que los oligonucleótidos antisentido pueden ser notablemente eficaces contra las enfermedades que afectan al encéfalo. Las dianas neurológicas «quedan ahora al alcance de la mano», nos dice Aartsma-Rus. Por ejemplo, hay varios fármacos a base de OAS en curso para la enfermedad de Huntington. Uno, conocido como RG6042, desarrollado por Ionis y Roche, se encuentra en la fase 3 de ensayo clínico. Scott Schobel, director médico del programa global de OAS para la enfermedad de Huntington en Roche, comenta que los primeros estudios de seguridad y tolerabilidad demostraron que se podía reducir la cantidad de proteína mutante, pero se ignora si eso tiene alguna relevancia clínica. El ensayo en curso debería aportar respuestas. Según Schobel, «consideraríamos una victoria un mero 30 por ciento de disminución». Eso equivaldría a que los pacientes recuperasen de tres a cuatro meses por año, al tiempo que conservan la funcionalidad.

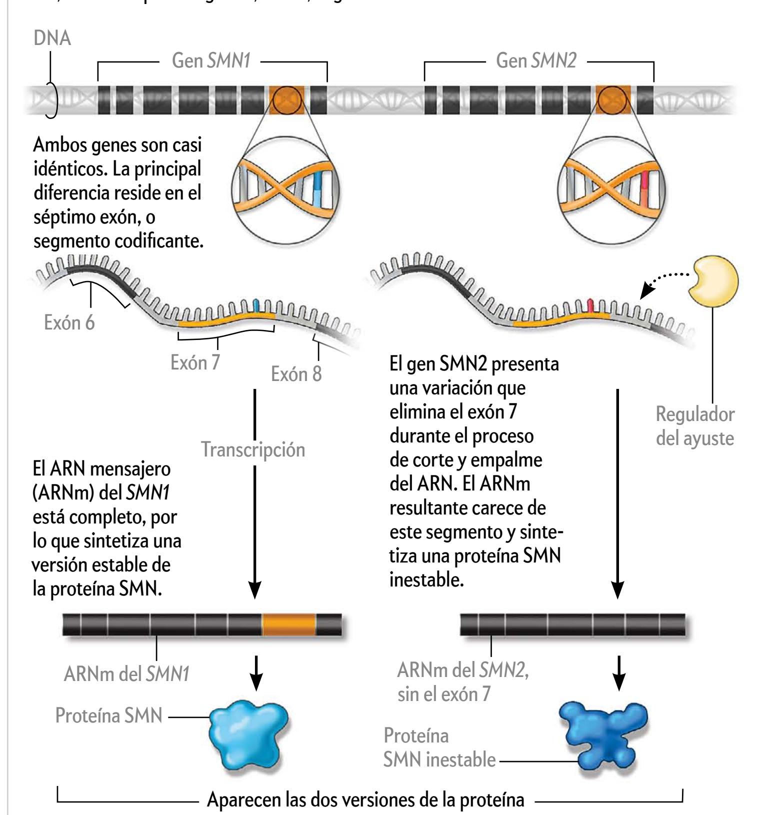
La esclerosis lateral amiotrófica, o ELA, es más complicada, pues los casos hereditarios de origen inequívocamente genético no llegan al 10 por ciento. La forma hereditaria más frecuente deriva de una mutación en el gen *C9orf72*; otra, radicada en el

El nusinersen, la historia de un éxito

Los oligonucleótidos antisentido (OAS) son pequeños segmentos de ADN o ARN diseñados para fijarse al ARN mensajero y modificar su traducción en proteínas. Tras décadas de fracasos, los investigadores han cosechado resultados espectaculares con el nusinersen, que detiene el avance de la atrofia muscular espinal, una enfermedad neurodegenerativa mortal, al hacer que un gen casi inactivo fabrique una proteína vital.

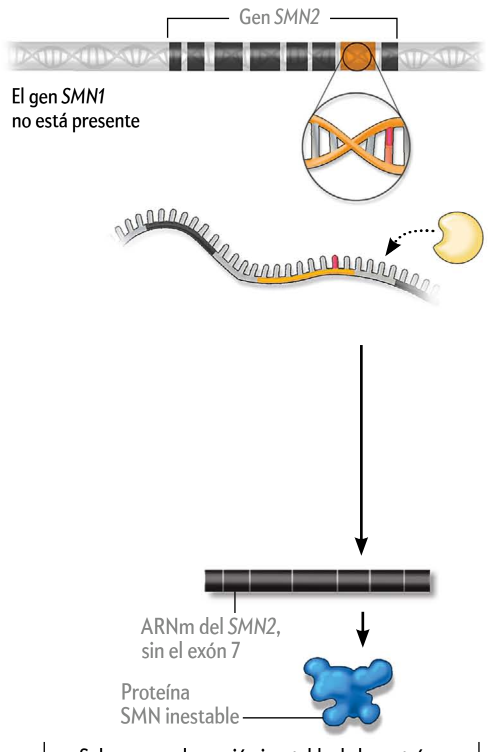
En las personas sanas...

Las personas suelen tener dos versiones del gen que produce la proteína SMN. La primera, denominada *SMN1*, produce una forma estable, mientras que la segunda, *SMN2*, la genera inestable.



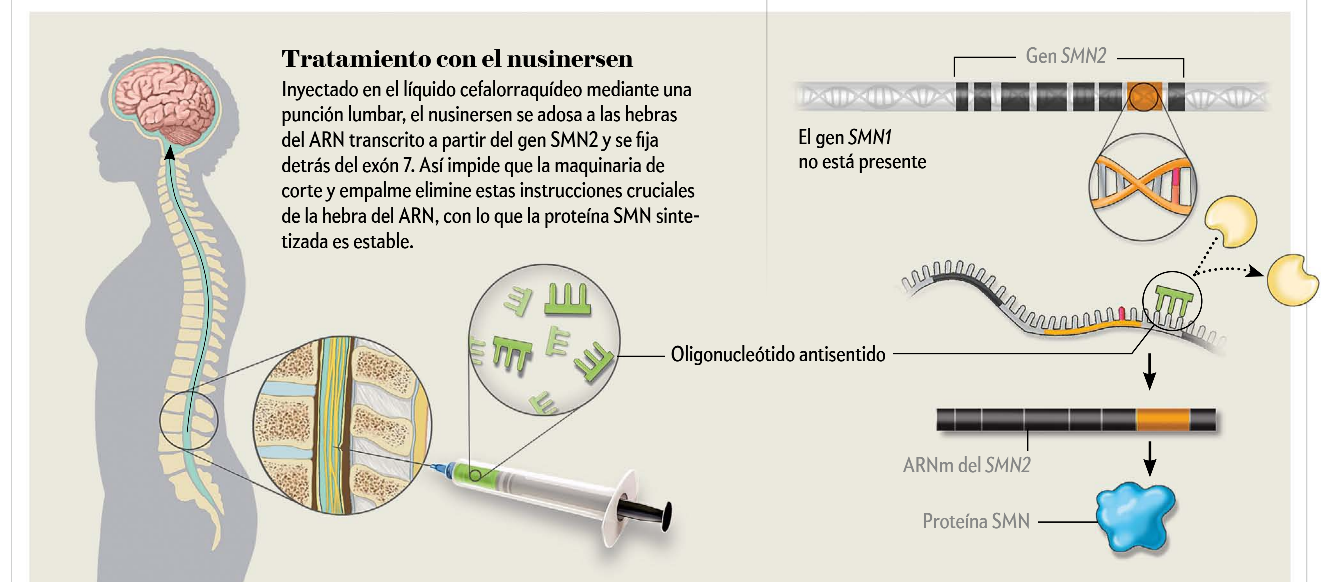
En las personas con AME...

Los pacientes con atrofia muscular espinal carecen del gen *SMN1*. Disponen del *SMN2*, pero produce muy poca proteína funcional.



Tratamiento con el nusinersen

Inyectado en el líquido cefalorraquídeo mediante una punción lumbar, el nusinersen se adosa a las hebras del ARN transcrito a partir del gen SMN2 y se fija detrás del exón 7. Así impide que la maquinaria de corte y empalme elimine estas instrucciones cruciales de la hebra del ARN, con lo que la proteína SMN sintetizada es estable.



MESA SCHUMACHER

gen *SOD1*, ocasiona cerca del 20 por ciento de los casos familiares. Por pequeña que sea esta fracción, la perspectiva de los oligonucleótidos antisentido ha renovado la esperanza cuando se agotaba. «Mi ánimo está por las nubes», confiesa Brown, el especialista en ELA que dirigió el equipo descubridor del *SOD1* en 1993. Están en marcha los ensayos clínicos de antisentidos para el tratamiento de las formas patológicas de *C9orf72* y *SOD1*. Ya se ha demostrado que son seguros, se toleran bien y suprimen la actividad de las proteínas mutantes.

Buena parte de la ilusión que muestran los médicos como Brown reside en que los antisentido también han posibilitado el desarrollo de fármacos a medida. Una joven de Iowa de nombre Jaci Hermstad, afectada por una forma muy rara de ELA debida a una mutación en el gen *FUS,* comenzó a tomar uno en verano de 2019. Hasta ahora lo está tolerando bien y ha experimentado pequeñas mejorías, como la recuperación de la movilidad del brazo.

UN FÁRMACO PARA MILA

Que a una persona le diseñen un fármaco personalizado se consideraba ciencia ficción hasta que el neurólogo Timothy Yu, del Hospital Infantil de Boston, creó uno en menos de un año para Mila Makovec, que hoy tiene nueve años. Mila sufre una afección ultraminoritaria denominada enfermedad de Batten, que es en realidad una familia de trastornos en que las mutaciones provocan la acumulación de proteínas y lípidos en las células. Los niños que la padecen no suelen superar la adolescencia.

Al igual que otros afectados por esta enfermedad, Mila hablaba y coordinaba extraordinariamente bien desde chiquita, pero con tres años, los dedos de los pies comenzaron a retraerse. Entre los cuatro y los cinco se volvió más torpe y comenzó a perder la vista. Los médicos del Hospital Infantil de Colorado acabaron conectando los síntomas con una mutación génica que la niña presentaba responsable de la enfermedad de Batten.

Como esta enfermedad necesita dos mutaciones génicas, la madre de Mila, Julia Vitarello, buscó a alguien que secuenciara el genoma de su hija para confirmar el diagnóstico. Los padres también querían saber si su hijo pequeño, Azlan, corría el mismo riesgo. En enero de 2017 su petición llegó a la mujer de Yu a través de las redes sociales.

El equipo de Yu secuenció el genoma de Mila y halló la segunda mutación que faltaba. Estaba causada por un gen saltarín o transposón, una secuencia de nucleótidos que se replica y se traslada a un punto del genoma que no le corresponde. El descubrimiento significaba que Azlan estaba fuera de peligro. Esto hizo pensar a Yu que se podría fabricar un fármaco para Mila. En sus propias palabras: «Nos dimos cuenta de que podíamos aprovecharnos del truco de Spinraza. Pero en vez de utilizar un oligonucleótido antisentido para forzar la inclusión de un exón desechado, lo usamos para bloquear un exón que se había entrometido».

Ante los reparos de varias compañías farmacéuticas, Yu supervisó en persona la fabricación. Una parte de los tres millones de dólares que Vitarello había invertido en la búsqueda de una cura acabaron en este proyecto (prefieren no especificar la cantidad). Yu le puso el nombre de «milasen» en honor a la única paciente que lo recibiría y le suministró la primera dosis en enero de 2018. Por entonces ya había perdido la visión y sufría de 20 a 30 crisis convulsivas al día, algunas de varios minutos. El daño que ya sufría era irreparable, pero el tratamiento alivió pronto las crisis, que al cabo de 4 o 5 meses duraban a lo sumo unos segundos. La madre dice que hace muy poco Mila pudo subir escaleras con su ayuda.

Cuando Yu describió el caso de Mila en el *New England Journal of Medicine* a finales de 2019, acabó en las noticias. También preocupaba el coste y la ética de diseñar un fármaco para una sola persona (tanto el comité de revisión institucional de Yu como la FDA lo autorizaron). La bioética Sara Goldkind, antigua empleada de la FDA y hoy consultora para programas de enfermedades minoritarias que asesora sobre el milasen, sostiene que el procedimiento es crítico en una situación extraordinaria como esta. Quedan pendientes las pruebas formales de seguridad y eficacia, pero son tantas las circunstancias atenuantes al ser enfermedades minoritarias, mortales y de evolución rápida que la FDA admitiría un único estudio bien controlado en vez de los dos exigidos por norma. Como dice Goldkind, «debemos ser flexibles en la aplicación de la normativa».

Crooke, que dejó de estar al frente de Ionis, creó una fundación para apoyar el desarrollo de fármacos personalizados de tipo antisentido contra enfermedades ultraminoritarias que afectan a muy pocas personas y no son viables desde el punto de vista comercial. Tanto Vitarello como Yu quieren poner a disposición de los niños como Mila los tratamientos personalizados. Una de las grandes ventajas de los oligonucleótidos antisentido es que sirven para crear fármacos a medida con rapidez y a bajo coste, a diferencia de la considerable suma invertida en Spinraza y en el milasen.

EMMA HACE EL FLAMENCO

Ni Emma ni Mila se han curado. Las neuronas que la primera perdió no han sido remplazadas y las secuelas en el aparato locomotor probablemente serán permanentes. En casa de los Larson hay amplios espacios de suelo de madera sin alfombrar, el mejor para que Emma, con 7 años cumplidos, pase disparada en la silla de ruedas, a la que llama su coche de carreras. Ya va al colegio y su momento favorito es el recreo, porque juega en el tobogán y en el columpio.

Cuando la silla está aparcada, los padres la llevan en brazos de una habitación a otra. Gatea por la sala de juegos para enseñarnos su juguete favorito. Con el andador y las sujeciones acopladas a sus deportivas de color rosa brillante, consigue dar unos pasos sola. En el comedor, con una mano en la mesa, se levanta del asiento apoyada contra la pared y, erguida, grita: «¡Eh!, miradme, estoy de pie sobre una pierna».

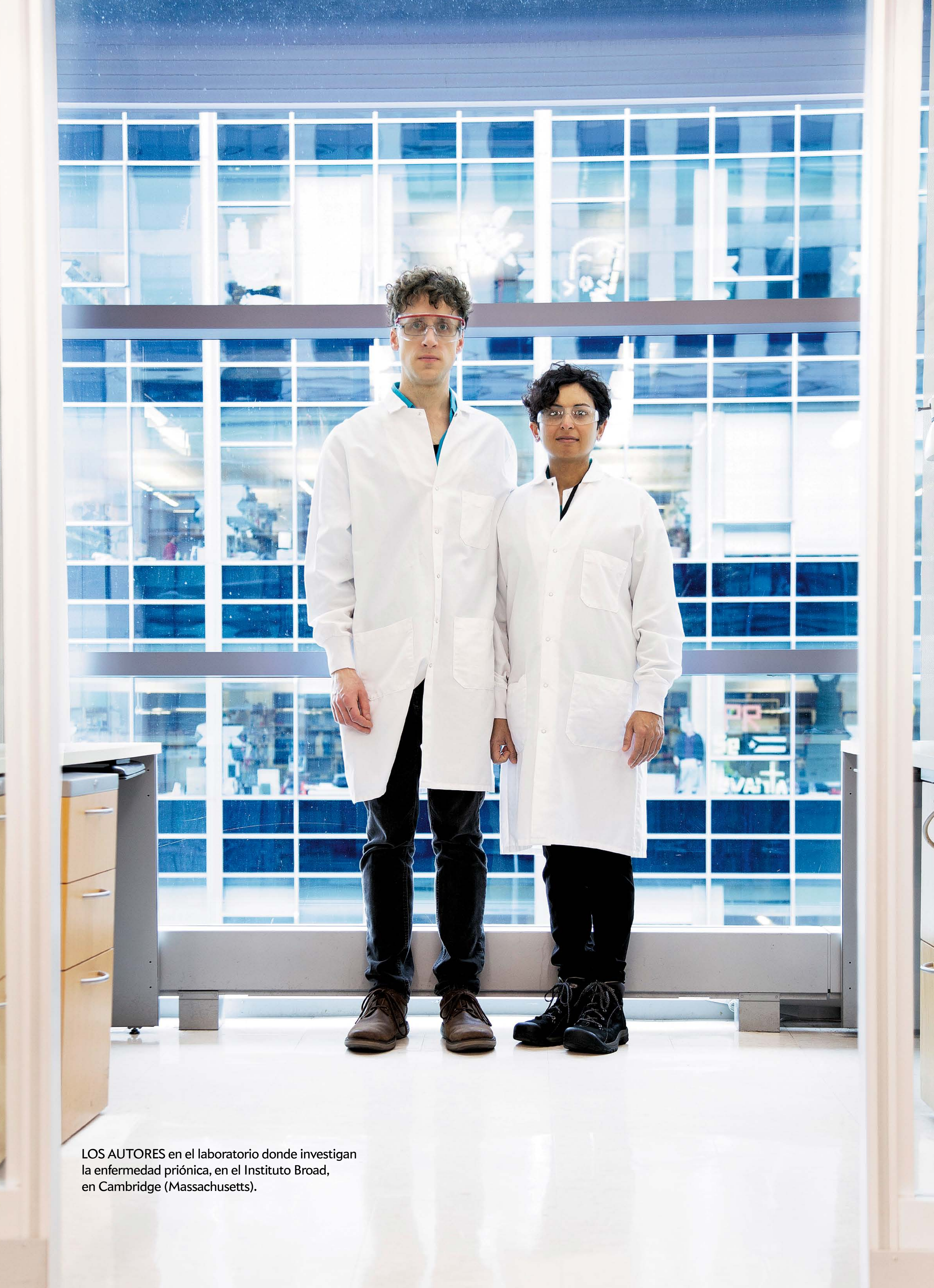
Los Larson admiten que la vida resulta difícil todavía, pero ya no pierden las esperanzas. Quieren que su hija goce de una vida independiente y se emocionan al comentarnos lo bien que les va a los recién nacidos que toman Spinraza. Con los ojos humedecidos, Diana nos dice: «Esto me llena el alma. Aunque ya sea un poco tarde para Emma, con ella se allanó el camino para otros niños». IyC

PARA SABER MÁS

Antisense oligonucleotide therapies for neurodegenerative diseases. C. Frank Bennett et al. en *Annual Review of Neuroscience*, vol. 42, págs. 385-406, julio de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

La revolución del ARN. Christine Gorman y Dina Fine Maron en *IyC*, junio 2014.
Genética de la esclerosis lateral amiotrófica. Leonard Petrucelli y Aaron D. Gitler en *IyC*, diciembre de 2017.
Prevenir la enfermedad priónica. Sonia Minikel Vallabh y Eric Vallabh Minikel, *en este mismo número*.



LOS AUTORES en el laboratorio donde investigan la enfermedad priónica, en el Instituto Broad, en Cambridge (Massachusetts).

NEUROLOGÍA

Prevenir la enfermedad priónica

El tratamiento preventivo de las personas con riesgo a sufrir esta enfermedad neurodegenerativa mortal parece la mejor manera de evitarla

Sonia Minikel Vallabh y Eric Vallabh Minikel

Fotografías de Ethan Hill

EN SÍNTESIS

La enfermedad priónica, que surge cuando la proteína PrP del cerebro se pliega mal y se convierte en un molde que induce la deformación de otras PrP, acaba con las neuronas con mayor rapidez que cualquier otra enfermedad neurodegenerativa.

El tratamiento con oligonucleótidos antisentido para reducir la cantidad de PrP en el cerebro todavía sano impediría la aparición de esta enfermedad mortal en las personas con predisposición genética a padecerla.

Los autores, que son matrimonio, relatan su experiencia personal y científica con esta grave enfermedad, que hizo cambiar sus carreras profesionales para buscar un tratamiento.

Sonia Minikel Vallabh y **Eric Vallabh Minikel** dirigen un laboratorio de investigación en el Instituto Broad, del Instituto de Tecnología de Massachusetts y de la Universidad Harvard, dedicado al desarrollo de un tratamiento o cura para la enfermedad priónica. La pareja cambió de profesión para convertirse en investigadores médicos después de saber que ella corre un serio riesgo de acabar padeciendo la mortal enfermedad.



NADIE PREVÉ QUE VIVIRÁ UN ANTES Y UN DESPUÉS EN SU VIDA, y que esta división se sustente en un acontecimiento único y decisivo. Cuando los dos nos conocimos, nos enamoramos, y más tarde nos casamos en el jardín de casa de Sonia, en Hermitage (Pensilvania), no teníamos ni idea de que estábamos en nuestra vida del «antes». No se nos había pasado por la cabeza abandonar nuestras carreras profesionales de derecho e ingeniería, ni empezar otra desde cero. No podíamos ni imaginarnos lo que tendríamos que bregar para aprender una disciplina totalmente nueva, ni que un día defenderíamos, codo con codo, tesis doctorales en biomedicina que permitirían imaginarse el primer tratamiento contra una enfermedad neurodegenerativa mortal.

Nuestra vida del «después» comenzó abruptamente el 9 de octubre de 2011, cuando Sonia supo que era portadora de una mutación genética infrecuente que le haría morir joven de un trastorno cerebral de progresión rápida: la enfermedad priónica. Este padecimiento se da cuando una proteína habitual de nuestro cerebro llamada PrP adquiere una forma anómala, a la que se denomina prion (resulta confuso que la versión normal de la proteína —PrP o proteína priónica— recibiera el nombre *después* de descubrirse y nombrarse la versión deformada, el prion). Un prion hace que otras copias normales de la PrP, al entrar en contacto con él, se deformen y se conviertan en priones. Esta cascada de plegamientos erróneos de las proteínas se extiende por el cerebro y destruye las neuronas a una velocidad que supera la de cualquier otra enfermedad neurodegenerativa.

A finales de año, tras saber que Sonia había heredado la temida mutación, nos dedicamos a cumplir una misión cuyo éxito implicaba mantener el cerebro de Sonia, y el de otros como ella, sano y funcional durante años o décadas, con suerte durante toda la vida. El fracaso significaba que, casi de golpe, se segaría en flor la vida de Sonia. Semanas después del primer síntoma visible, sufriría daños cerebrales devastadores y dejaría de ser la persona que era.

Como la responsable de la enfermedad es una única proteína aparentemente prescindible, la PrP, albergamos la esperanza de que las técnicas actuales logren reducir su concentración en el cerebro para que se agote el combustible que impulsa la propagación de los mortíferos priones. El problema radica en la asombrosa velocidad con la que avanza la enfermedad: la única posibilidad de vencerla pasa por actuar antes de que sobrevenga la catástrofe. Pero lo habitual no suele ser prevenir una dolencia, sino intervenir una vez que se ha manifestado. Llevamos ocho años librando cada día una batalla sin cuartel para forjar un nuevo paradigma en el desarrollo de fármacos. Este consiste en ensayar un medicamento prometedor no solo por su capacidad de frenar el avance de la enfermedad, sino también por la de mantener más tiempo sano el cerebro.

AÑO DE CRISIS

Meses antes de conocer la noticia, habíamos sido testigos del avance de la enfermedad priónica en Kamni, la madre de Sonia. En febrero de 2010, todavía con buena salud y una función cognitiva alta, acudió al oftalmólogo porque veía borroso. El 17 de marzo, cuando Sonia la telefoneó para felicitarla por su 52º cumpleaños, Kamni era incapaz de acabar una sola frase sin perder el hilo. En mayo no se le entendía cuando hablaba, la mitad del tiempo no reconocía a sus familiares y olvidaba que ya no sabía andar, lo que significaba que, a pesar de que intentábamos hacerlo lo mejor posible, se levantaba continuamente, se caía al suelo y se lesionaba. A partir de junio, quedó anclada a una silla de ruedas y hubo que ingresarla varias veces en el hospital. Todavía era capaz de mirarnos a los ojos, pero comenzó a evitar que la tocaran. El consuelo de la compañía de los seres queridos quedó remplazado





ERIC VALLABH Y SONIA MINIKEL con su hija Daruka (*1*). Sonia ha heredado una mutación responsable de la enfermedad priónica, que causó la muerte de su madre. No obstante, la pareja alberga la esperanza de encontrar un fármaco que a ella la mantenga sana indefinidamente. Comprobaron que Daruka no presentaba la mutación cuando todavía era un embrión; la niña sujeta una foto de su abuela materna (*2*).

por un constante miedo a cualquier manoseo o pinchazo de aguja que acabó implicando la presencia humana. En julio era incapaz de hablar, comer o incorporarse. Su rostro reflejaba agonía y los ojos, miedo, y se batía continuamente contra las correas que las enfermeras utilizaban para atarle las manos a la cama y así evitar que se arrancara los catéteres de alimentación y de colostomía. En agosto estaba en permanente intubación y ventilación artificial, muda e inmóvil. Y seguía sin diagnóstico.

Ese año, como consecuencia de la crisis principal, vinieron las de segundo y tercer orden. ¿Qué hacer cuando alguien requiere más cuidados de lo que una persona, o incluso toda una familia, puede proporcionarle? Los hospitales no fueron la solución para esta pregunta, porque una vez acabadas las pruebas y rechazados todos los posibles diagnósticos, la mandaban a casa hasta que la siguiente complicación inevitable (una lesión en la cabeza, neumonía) justificara un nuevo ingreso. La situación de crisis constante y la pérdida repentina de las rutinas domésticas implicó que no se pagaran las facturas, que se bloquearan las cuentas bancarias y que cortaran la luz. Y eso que podíamos considerarnos afortunados porque el seguro médico de Kamni cubrió casi todas las facturas médicas de ese año, que rondaron el millón de dólares.

Murió en diciembre y sentimos algo que nunca imaginábamos que podríamos asociar a la muerte de un ser querido: alivio. No fue una despedida, ya que nos dimos cuenta de que ya le habíamos dicho adiós antes. La demencia nos privó no solo de la persona que queríamos, sino también de una despedida en presente.

Después de la muerte de Kamni, intentamos lentamente dejar atrás todo lo malo, aunque lo peor estaba por llegar. Cuando en octubre regresamos a casa para la fiesta de compromiso de un amigo de la familia, atribuimos los largos silencios del padre de Sonia y sus miradas distantes al desconsuelo, a la soledad y al desgaste emocional. Pero cuando cargábamos las maletas en el maletero del coche para irnos al aeropuerto, apartó a Sonia y nos dio una noticia que nos partió la vida en dos. La autopsia había revelado que Kamni sufrió insomnio familiar mortal, un tipo de enfermedad priónica de origen genético. Tenía una anomalía en el gen productor de la PrP y el riesgo de que Sonia lo tuviera era del 50 por ciento. A finales de 2011 supimos que, en efecto, Sonia había heredado la mutación de la madre, lo que significaba que, con toda probabilidad, también desarrollaría la enfermedad priónica. Solo tenía 27 años.

Casi en ese instante decidimos consagrar nuestra vida a encontrarle cura. Nos apuntamos a la escuela nocturna para aprender biología, abandonamos nuestras antiguas profesiones para iniciarnos en el trabajo de los laboratorios de investigación y, en 2014, nos matriculamos en el programa de doctorado de la Escuela de Medicina de Harvard. En la actualidad estamos en el Instituto Broad en Cambridge, Massachusetts, donde pusimos en marcha un laboratorio de investigación sobre los priones. Huelga decir que no habíamos alcanzado tal especialización solo para mantener viva a Sonia en un estado de profunda demencia durante doce meses en lugar de seis. El propósito era, y es, mantener sano su cerebro durante muchos años y, si es posible, para siempre. El objetivo es la prevención.

UN PLEGAMIENTO MORTAL

La enfermedad priónica se presenta en una variedad de formas, entre ellas la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob (ECJ), el insomnio familiar mortal, la encefalopatía espongiforme bovina (EEB o enfermedad de las «vacas locas»). Recibió muchos de los nombres bastante antes de 1982, cuando el neurólogo Stanley B. Prusiner descubrió que el agente causal de todas ellas era una proteína, un hallazgo que le valió el premio Nobel. Si quitamos el deplorable casi 1 por ciento de casos humanos que la adquirieron por infección (por carne contaminada), la mayoría de las enfermedades priónicas surgen al azar. De manera espontánea, una molécula de PrP en el cerebro de una persona adquiere una conformación o patrón de plegamiento anómalos, lo que desen-

cadena una reacción en cadena imparable. A diferencia de la enfermedad priónica «esporádica», alrededor del 15 por ciento de los casos están provocados por mutaciones en el gen *PRNP*, que codifica la proteína PrP. Por razones que no conocemos del todo, estas mutaciones aumentan la probabilidad de que la proteína se pliegue mal. Mientras que una persona con las dos copias normales de *PRNP* tiene una probabilidad de 1 entre 5000 de que las PrP se le deformen espontáneamente a lo largo de la vida, el riesgo de padecerla para alguien con la mutación de Kamni supera el 90 por ciento.

El gen *PRNP* está localizado en el brazo corto del cromosoma 20 de los humanos. Comprende 15.000 pares de bases, de las que 762 codifican la proteína que, en su forma madura, se queda con 208 aminoácidos. La mayoría de las variantes que dan lugar a la enfermedad priónica genética consisten en cambios de una sola base del *PRNP* que alteran tan solo un aminoácido en la molécula de la PrP resultante. Algunas veces se expande un segmento repetitivo del gen, lo que conduce a una versión más larga de la PrP.

En su conformación normal, aproximadamente la mitad de la longitud de la proteína normal está bien plegada y contiene sobre todo «hélices α», una estructura en espiral típica de las proteínas. En el extremo de esta sección, la PrP tiene un anclaje glucídico que la une a la superficie externa de la membrana celular, su hábitat natural (una variante patógena del gen genera una PrP más corta que carece de dicho anclaje). La otra mitad de la proteína no tiene una estructura definida y forma una cola flexible que cuelga de la superficie de la célula hacia el espacio intercelular.

Aunque no se conoce del todo la forma de los priones, sí se sabe que suelen tener más «láminas β» (aminoácidos en hojas plisadas apilables) que hélices α. Con esta forma, la proteína es más resistente a la degradación enzimática. Lo que la convierte en prion (partícula infecciosa proteica) es su capacidad para inducir el plegamiento erróneo de otras copias de PrP cuando se unen a ella. Una cascada de priones se extiende por el cerebro mediante la formación de fibrillas y agregados que destruirán las células nerviosas mediante mecanismos que seguimos sin tener claros.

Los priones también se presentan en distintas cepas con diferentes propiedades, las cuales pueden determinar qué especies animales son vulnerables a ellas y cómo se las reconoce clínicamente. Para hacerlo aún más complejo, parece que cada cepa cuenta con varias conformaciones de PrP mal plegadas (de manera análoga a la diversidad genética que existe en una población de bacterias, que, en el contexto de una infección, confiere a una de ellas más oportunidades que al resto cuando las circunstancias cambian). Esta variabilidad explicaría el fracaso de las estrategias farmacológicas que han buscado compuestos que redujeran el número de priones en las células. Por ejemplo, el antipalúdico mepacrina resulta eficaz contra los priones en los cultivos celulares, pero su ineficacia con los pacientes se ha puesto de manifiesto en varios estudios con humanos, incluido un ensayo clínico aleatorizado con doble anonimato realizado en 2013. Las investigaciones con la mepacrina y otros compuestos en el laboratorio de Prusiner, en la Universidad de California en San Francisco, sugieren ahora que, incluso si un fármaco hace desaparecer una de estas conformaciones mal plegadas, podrían formarse otras que presentaran resistencia al fármaco.

EL PARADIGMA DE LA PREVENCIÓN

Otro importante reto consiste en encontrar las personas idóneas en las que se pondrán a prueba los posibles fármacos. Los ensayos clínicos típicos incorporan personas enfermas para ver si las que reciben la medicación se sienten mejor, funcionan mejor o sobreviven más que los que reciben el placebo. Pero en esta enfermedad de progresión tan rápida, para cuando se identifican los pacientes sintomáticos, ya están profundamente debilitados. En el ensayo clínico más grande descrito sobre la enfermedad priónica, en el que se analizó la doxiciclina, se estimó que la mitad de los pacientes vivían ya con soporte vital antes de ser tratados (la doxiciclina no les ayudó).

El meollo del problema reside en el ritmo endiablado de la enfermedad: los priones se replican de manera exponencial. Incluso antes de que aparezcan los síntomas, miles de millones de priones ya abarrotan el cerebro. Una vez que comienzan a destruir células, el ritmo resulta apabullante; en ese punto, incluso un fármaco eficaz contra los priones tal vez lo logre ayudar. En los ensayos futuros se podrían seleccionar pacientes «sintomáticos precoces», pero dar con el comienzo de la enfermedad es increíblemente difícil. Los médicos no empiezan a sospechar sobre ella hasta que transcurren de media tres meses desde el primer síntoma del paciente (cuando Kamni ya no podía hablar). Incluso un fármaco que detuviera la enfermedad en esa etapa no conseguiría deshacer los daños cerebrales sufridos.

Así pues, un fármaco que mantuviera sana a Sonia podría resultar ineficaz para los pacientes avanzados en una etapa sintomática. Los resultados de los compuestos antipriónicos ensayados en ratones hacen pensar que este podría ser el caso de muchos de los fármacos que desarrollemos contra la enfermedad priónica. Una molécula pequeña diseñada en el laboratorio de Prusiner, de nombre IND24, cuadruplica la esperanza de vida de los ratones infectados con priones si se les administra como prevención, pero no es tan eficaz si se administra más tarde, y va perdiendo su eficacia a medida que los ratones se acercan a la etapa sintomática. Los otros tres compuestos que han demostrado ser eficaces contra las cepas murinas de priones también lo son más cuanto antes se comience el tratamiento.

Los científicos han lidiado con las mismas cuestiones durante años cuando afrontaban la enfermedad de Alzheimer, que también se caracteriza por la agregación de proteínas. Los fármacos candidatos que actúan selectivamente sobre la acumulación del amiloide β, la proteína anómala que aparece en el cerebro de los enfermos de alzhéimer, han resultado incapaces, ensayo tras ensayo, de proporcionarles ningún beneficio. De ahí que planteara si la hipótesis terapéutica era errónea o si simplemente se estaba interviniendo demasiado tarde. Se están empleando dos estrategias para comprobar si los fármacos antiamiloideos consiguen retrasar la enfermedad cuando se administran pronto. Una es la asignación aleatoria de personas aún sanas con un alto riesgo genético de padecer precozmente alzhéimer a grupos que reciben fármacos o placebo, a los que se sigue durante años para ver quién desarrolla el declive cognitivo. La otra estrategia, a veces denominada «prevención secundaria», incorpora personas con salud cognitiva pero con indicios moleculares del proceso patológico, para ver si un fármaco retrasa la progresión en la enfermedad sintomática. Dichos marcadores moleculares aparecen muchos años antes de que esta se manifieste.

Puede que ninguna de estas estrategias funcione para la enfermedad priónica. El seguimiento de los individuos con predisposición genética a sufrirla resulta impracticable porque varía mucho la edad a la que se inicia y la población de pacientes es pequeña. Tanto nosotros como otros investigadores hemos estudiado a las personas con riesgo de padecer la enfermedad priónica, pero no hemos hallado ninguna prueba sólida sobre

una progresión patológica como la que precede al alzhéimer. La enfermedad priónica es básicamente indetectable antes de que se manifieste la demencia: no es el ruido sordo de un tren de mercancías acercándose, sino más bien un rápido vistazo hacia arriba antes de que impacte un asteroide.

ELIMINAR EL COMBUSTIBLE

¿Adónde nos lleva esta situación? Si los ensayos con los pacientes sintomáticos pueden inducirnos a error y los ensayos para la prevención son inviables, ¿cómo demostraremos que un fármaco podría salvar la vida de Sonia? Hemos llegado a la conclusión de que la respuesta la tuvimos al comienzo de nuestra cruzada, en los propios resultados de las pruebas genéticas que nos cambió la vida. Ya conocíamos el único gen que provoca esta enfermedad y la única proteína que en el futuro funcionaría mal. La clave reside entonces en actuar sobre la PrP normal antes de que se pliegue mal.

Si conseguimos reducir la cantidad de PrP producida en el cerebro, todos los datos indican que retrasaremos la enfermedad. Los ratones que sintetizan la mitad de la cantidad normal de PrP tardan más del doble en desarrollar la enfermedad priónica cuando se infectan. Con menos PrP disponible, los priones necesitan mucho más tiempo para replicarse. Por fortuna para nosotros, la PrP no es esencial para el funcionamiento del cerebro: los ratones, las cabras y las vacas a las que se suprime este gen están sanos, al igual que las personas con una copia inactiva del gen.

Hoy en día puede reducirse la PrP del cerebro de modo específico gracias a los oligonucleótidos antisentido (OAS). Se trata de fragmentos pequeños de ADN cuya secuencia está diseñada para actuar solo sobre una molécula de ARN de interés, con lo que se desencadena su destrucción para que ya no produzca más proteínas. Recientemente, Ionis Pharmaceuticals, en Carlsbad (California), ha resuelto cómo desarrollar y dosificar los OAS en el sistema nervioso central humano. De la mano de esta empresa, hemos hallado en los últimos cinco años que los OAS que reducen la cantidad de PrP mantienen sanos a los ratones infectados con priones durante más tiempo. Estos resultados preclínicos, combinados con datos clínicos, genéticos y de otro tipo que hemos reunido, junto con el registro de pacientes que hemos puesto en marcha, han convencido a la junta directiva de Ionis: se han comprometido a desarrollar un fármaco contra la enfermedad priónica basado en los OAS, con el propósito de acometer los primeros ensayos con humanos en los próximos años. Por primera vez, un peso pesado de esta industria se ha implicado en el desarrollo de un tratamiento dirigido y razonado contra este mal.

Si los OAS que disminuyen la PrP acaban beneficiando a los pacientes con síntomas estaremos encantados. Pero necesitamos encontrar la forma de que sirvan también a los pacientes en riesgo, aunque solo les valgan de prevención. Proponemos que la concentración de PrP en el líquido cefalorraquídeo puede servir de biomarcador farmacodinámico, o sea, de medida molecular para saber si el fármaco muestra el efecto deseado. Esta lectura puede servir, a su vez, de biomarcador de sustitución (el resultado medido en un ensayo clínico cuando no se puede valorar directamente la mejoría de los pacientes). En otras palabras, proponemos el tratamiento de personas sanas y demostrar que les disminuye la cantidad de la proteína causante de la enfermedad. Estados Unidos tiene un marco legal denominado Autorizaciones Aceleradas para tales vías clínicas, que se ha empleado ya antes, como el uso de la «carga vírica» para autorizar los fármacos contra el VIH/sida.

En 2017, llevamos esta propuesta a una reunión con la FDA y hallamos mucho entusiasmo por nuestra estrategia preventiva. Salimos con una lista de deberes y un nuevo equipo de aliados. Dos años después, hemos aprendido a medir con precisión la PrP en el líquido cefalorraquídeo y hemos recopilado pruebas de que se fabrica en el sistema nervioso central. También sabemos que su concentración es lo bastante estable en el tiempo como para determinar si disminuye como consecuencia del fármaco.

UN CAMINO POR DELANTE

Seguimos topándonos con una resistencia considerable. ¿A qué edad habría que comenzar el tratamiento? ¿Cómo confirmar que el fármaco retrasa la enfermedad? Estas preguntas son importantes y tenemos las herramientas para concebir respuestas convincentes. Pero el nivel de ansiedad que rodea a estas cuestiones refleja los escasos precedentes de intervenciones terapéuticas para mantener sano el cerebro. Quizás, la pregunta que más nos detiene es: ¿pagarán las aseguradoras esta clase de fármacos? Y a continuación, la decisiva: ¿pagará la sociedad un fármaco con receta durante años y años a quienes no están enfermos y que, si el fármaco funciona, nunca lo estarán?

Por una vez, la infrecuencia de la enfermedad priónica trabajaría a nuestro favor. Los pacientes que la sufren son escasísimos, los de origen genético aún más, y los que conocen su riesgo antes de que aparezca son aún más excepcionales. Nuestro impacto en las cuentas de una aseguradora no es nada comparado con un nuevo fármaco contra una cardiopatía o contra la diabetes, que tomarán millones de pacientes. Pero hay una perspectiva aún más amplia: como sociedad, necesitamos preguntarnos qué queremos para nuestro cerebro. Si uno supiera que está entre ese 20 por ciento de personas que padecerá una enfermedad neurodegenerativa y tuviera un fármaco preventivo, ¿cuándo se lo tomaría? ¿Esperaría a que comenzara la demencia? ¿A sufrir un deterioro cognitivo leve? ¿A que la resonancia mostrase la retracción del cerebro? ¿O lo tomaría antes de que ocurriera nada de ello?

En la enfermedad priónica no tendríamos elección. Pero esto significa también que tenemos la oportunidad de seguir avanzando hacia el objetivo de la prevención. Ante cualquier avance de la neurociencia moderna, cada cerebro humano aparece insoportable e inabarcablemente complejo, una red de casi 100.000 millones de neuronas interconectadas que no entendemos, no sabemos reparar y, posiblemente, no podamos remplazar. Si el lector se pregunta qué quiere para su cerebro —y el del los que más quiere en el mundo—, su respuesta casi con seguridad coincidirá con la nuestra: prevención.

PARA SABER MÁS

Antisense oligonucleotides extend survival of prion-infected mice. Gregory J. Raymond et al. en *JCI Insight*, vol. 4, n.º 16, artículo e131175, 22 de agosto de 2019.

The patient-scientist's mandate. Sonia M. Vallabh en *New England Journal of Medicine*, vol. 382, n.º 2, págs. 107–109, 9 de enero de 2020.

EN NUESTRO ARCHIVO

El prion en la patología. Stanley B. Prusiner en *IyC*, marzo de 1995.

Detección de la enfermedad de las vacas locas. Stanley B. Prusiner en *IyC*, septiembre de 2004.

Gérmenes de la demencia. Lary C. Walker y Mathias Jucker en *IyC*, julio de 2013.

El principio de los priones. Simon Makin en *MyC*, n.º 84, 2017.

Nuevos fármacos contra las enfermedades minoritarias. Lydia Denworth, *en este mismo número*.

por H. Joachim Schlichting



H. Joachim Schlichting es exdirector del Instituto de Didáctica de la Física de la Universidad de Münster.

Centrifugadoras caninas

Para secarse, numerosos animales efectúan rápidas sacudidas corporales. Dicho mecanismo es mucho más eficiente de lo que podría parecer. ¿A qué se debe?

Todo aquel que se halle junto a un perro que se está sacudiendo el agua de encima se percatará enseguida de lo eficiente que resulta la técnica. En cuestión de segundos, una gran parte del agua acumulada en el pelaje del animal sale despedida en todas direcciones. Eso explica por qué algunos perros se lanzan al agua sin vacilar incluso en aquellas situaciones en que la temperatura no invita precisamente a darse un baño.

Cuando el animal se sumerge, el líquido reemplaza parte del aire retenido en el pelaje. El agua conduce mejor el calor y aumenta unas 12 veces el ritmo al que este se transfiere del cuerpo al entorno, lo que conlleva un cierto riesgo de hipotermia. Por ejemplo, si un perro de 30 kilogramos con medio litro de agua en su pelaje esperase a que toda ella se evaporara por sí misma, perdería alrededor del 20 por ciento de la energía que obtiene al día mediante la ingesta de alimentos.

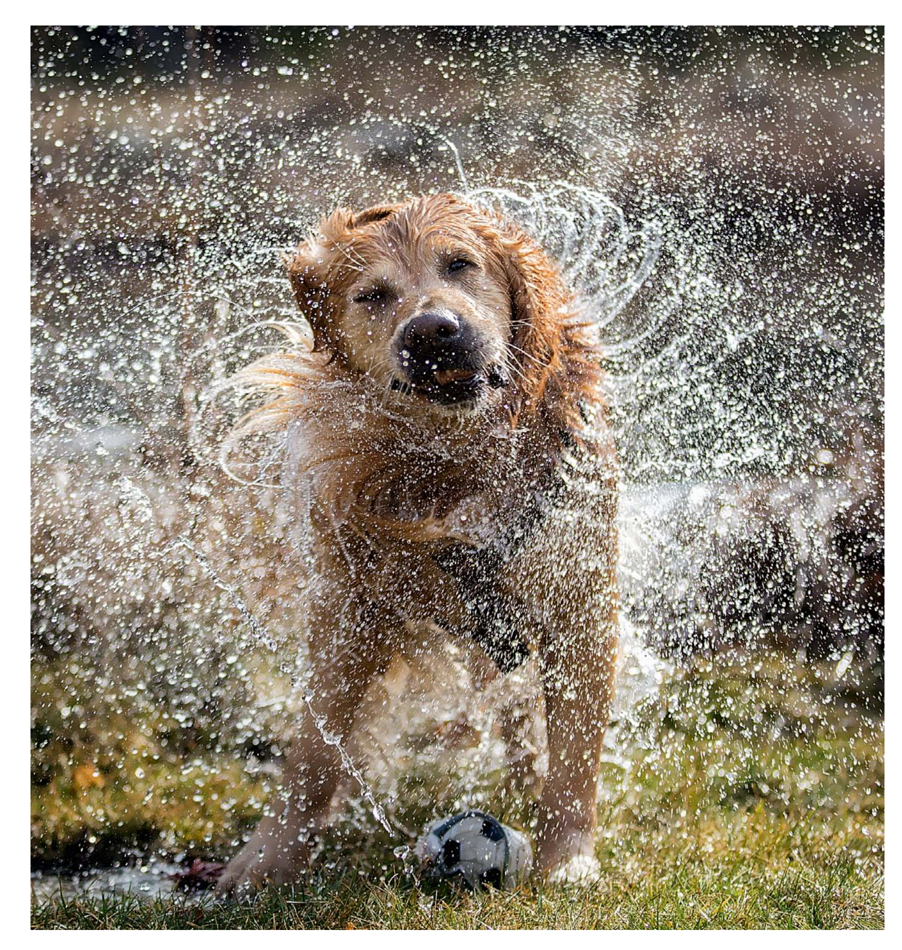
Al salir del agua tras un baño, sentimos de inmediato el efecto refrescante de la piel húmeda; aun cuando la temperatura exterior es agradable, la mínima brisa puede hacernos tiritar. Y dado que muchos animales terrestres pueden llegar a acumular grandes cantidades de agua en su tupido pelaje, su situación es notablemente más seria: mantener seco el cuerpo puede resultar clave para la supervivencia.

Fuerzas opuestas

Como tantos otros materiales, el pelaje de un perro es en buena parte hidrófilo; es decir, el agua se adhiere a él con facilidad. En última instancia, esto ocurre porque la formación de una interfase entre el pelo y el agua requiere menos energía que la de una interfase con el aire, lo cual genera una fuerza neta de adhesión.

Para vencerla y conseguir que las gotas se desprendan del pelaje, es por tanto necesario aplicar una fuerza opuesta. Las gotas con un cierto tamaño mínimo y una superficie de contacto con el pelaje relativamente pequeña suelen caer por efecto de la gravedad. Sin embargo, al principio la mayor parte del agua queda atrapada.

Para deshacerse de ella, muchos animales se sacuden, sometiendo su cuerpo —y el pelaje empapado— a enérgicos movimientos. Cuando la fuerza que empuja a las gotas de agua a seguir una trayectoria



GETTY IMAGES/DIETERMEYRL/ISTOCK

LOS PERROS no son los únicos animales que se sacuden para secarse. Otros mamíferos también lo hacen, desde roedores hasta osos. En 2012, un grupo de investigadores del Instituto de Tecnología de Georgia modelizó este comportamiento en 16 especies y halló que la frecuencia de las sacudidas depende como una potencia inversa del peso corporal. En el caso de los ratones, es tan elevada que nuestros ojos no pueden apreciar el movimiento.



MUCHOS ANIMALES TERRESTRES pueden llegar a acumular grandes cantidades de agua en su pelaje, por lo que desprenderse de ella con premura resulta clave para evitar el riesgo de hipotermia. La manera más rápida de lograrlo consiste en «centrifugar» el agua efectuando sacudidas periódicas con el cuerpo, un proceso que consiguen llevar a cabo de manera mucho más eficiente que los motores de las mejores lavadoras.

GETTY IMAGES/MAARTEN1986/ISTOCK

circular supera la correspondiente fuerza adhesiva, las gotas se separan del pelaje.

Según el principio de inercia, las gotas liberadas continúan moviéndose en línea recta y a velocidad constante. O mejor dicho, lo harían si no existiese la omnipresente gravedad, la cual las lleva a describir una parábola que depende de la velocidad a la que se desprenden. Como consecuencia, un perro mojado que se sacude se verá rodeado de una nube de gotas de varios tamaños que se alejan siguiendo distintas trayectorias.

Más eficiente que la tecnología

Hace tiempo que también las personas aprovechamos el principio que gobierna este método de secado. Al centrifugar, las lavadoras hacen que la ropa gire a una velocidad tan elevada que una buena parte del agua se desprende de las fibras y escapa por los agujeros del tambor. Pero, como todos sabemos, este proceso requiere varios minutos, mientras que un perro se libera del agua en mucho menos tiempo. ¿Cuál es su secreto?

En 2012, un equipo de investigadores liderado por David L. Hu, del Instituto de Tecnología de Georgia, investigó en detalle la cuestión. Gracias a la ayuda prestada por el zoológico de Atlanta, los autores midieron el tamaño de distintos mamíferos, los mojaron y los grabaron con cámaras de alta velocidad mientras se sacudían el agua.

Lo que observaron fue que, por lo general, el animal comienza girando rápidamente la cabeza, mientras que el resto del cuerpo lo hace con una cierta diferencia de fase. La columna vertebral puede rotar unos 30 grados en una dirección u otra. Pero la piel se desplaza fácilmente y gira mucho más, hasta 90 grados a cada lado, y lo hace considerablemente más deprisa que la propia columna. Esto se debe a la inercia, que provoca que la piel siga moviéndose unos instantes más, si bien es probable que también desempeñen un papel las fuerzas elásticas derivadas de la unión al resto de tejidos corporales, las cuales tiran de la piel como bandas elásticas.

En todo caso, según los cálculos de los investigadores, las gotas de agua catapultadas quedan expuestas a fuerzas entre 10 y 70 veces mayores que la gravedad. Las aceleraciones son tales que los animales cierran los ojos para evitar lesiones.

Cuando el animal se sacude para secarse, primero se desprenden las gotas adheridas a la punta de los pelos. Al mismo tiempo, la humedad de las capas más profundas se desplaza hacia afuera y es liberada en la siguiente sacudida. El proceso continúa hasta que prácticamente toda el agua se desprende y el pelaje se ha secado lo suficiente.

Velocidad y masa corporal

La fuerza que acelera las gotas varía y depende del radio de curvatura del movimiento: cuanto mayor es el animal, más impulso genera. Como consecuencia, y en las mismas condiciones, los mamíferos de menor tamaño han de sacudirse con una frecuencia mayor para deshacerse del agua.

Los perros labradores, por ejemplo, suelen hacerlo al ritmo de unas 4,5 sacudidas por segundo. En cambio, los ratones necesitan llegar a la asombrosa cifra de 29 sacudidas por segundo: un movimiento tan rápido que nuestros ojos no consiguen percibirlo. Gracias a un modelo cuantitativo, los investigadores hallaron una relación bastante precisa entre la masa del animal y la frecuencia de las sacudidas.

Así que la próxima vez que veamos un perro salir del agua, tal vez nos merezca la pena observarlo con calma en vez de alejarnos a toda prisa. Puede que nos mojemos, pero también seremos testigos de un proceso físico mucho más interesante de lo que parece. IyC

PARA SABER MÁS

Wet mammals shake at tuned frequencies to dry. Andrew K. Dickerson, Zachary G. Mills y David L. Hu en *Journal of the Royal Society, Interface*, vol. 9, págs. 3208-3218, diciembre de 2012.

José Manuel Sánchez Ron es miembro de la Real Academia Española y catedrático emérito de historia de la ciencia en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.



HISTORIA DE LA CIENCIA

Ronald Fisher: genética y matemáticas

El renacimiento de la teoría de la evolución

José Manuel Sánchez Ron

Aunque en la actualidad la teoría de la evolución de las especies que Charles Darwin presentó en *The origin of species* (1859) sea mayoritariamente aceptada, formando parte, además, de lo que puede denominarse «cultura general», después de su publicación pasó por un largo periodo en el que no era aceptada por gran parte de los naturalistas, biólogos y paleontólogos. David M. S. Watson, catedrático de zoología y anatomía comparada en el Colegio Universitario de Londres, ofrece un buen ejemplo en este sentido. En la conferencia que pronunció en calidad de presidente de la Sección de Zoología de la reunión de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia que se celebró en 1929, manifestó lo siguiente: «Las únicas dos "teorías de evolución" que han obtenido alguna atención, la de Lamarck y la de Darwin, se apoyan en una base muy poco segura; la validez de las suposiciones en que se basan ha sido examinada pocas veces y no interesan a la mayoría de los zoólogos jóvenes».

Darwin hablaba de competencia entre poblaciones de especies, pero no utilizó ningún procedimiento preciso para relacionar esa competencia con la generación de nuevas especies. No fue capaz de aplicar técnicas estadístico-matemáticas a sus formulaciones naturalistas, algo que sí hizo el monje agustino y botánico Gregor Mendel (1821-1884), el fundador de la genética. Los experimentos que realizó con guisantes le condujeron a proponer una teoría de la herencia, que, básicamente, es la que, desarrollada, se impondría.

El primer paso en la dirección de enriquecer la formulación darwiniana con un tratamiento matemático procedió de una persona inesperada, un hombre nada interesado en las posibles aplicaciones de la matemática: Godfrey Harold Hardy. Lo que hizo este matemático inglés fue aplicar sus conocimientos a la entonces incipiente genética mendeliana. Publicó su trabajo en una nota, de apenas una página, que apareció en el número del 10 de julio de 1908 de la revista *Science*: «Proporciones mendelianas en una población mixta». Al mismo resultado de Hardy llegó también, el mismo año y de forma independiente (publicó su estudio en *Jahreshefte des Vereins für vaterländis che Naturkunde in Württemberg*), el médico Wilhelm Weinberg. De ahí el nombre por el que esa formulación se conoce como «ley de Hardy-Weinberg».

El problema del que se ocupaba esa ley surgió en los primeros intentos de aplicar modelos matemáticos —aunque muy sencillos— a la aparición de modificaciones en la descendencia de una pareja, producidos si los padres se desviaban en cierto grado de la media de la población. Los análisis teóricos demostraban que tales desviaciones terminaban desapareciendo, debilitadas en los cruces entre individuos. Así que, ¿cómo explicar la aparición de



RONALD A. FISHER en 1946.

nuevas especies? En sus artículos, Hardy y Weinberg demostraron que si se supone, con Mendel, que existen unidades discretas que transmiten de padres a hijos los caracteres hereditarios, se mantienen solo nuevos rasgos, que finalmente acaso produzcan especies diferentes, si aparecen fuerzas externas perturbadoras como la selección o la mutación. Sin ellas, y tal y como lo expresaba Hardy en su nota, «no existe el menor fundamento para la idea de que un carácter dominante puede mostrar tendencia a extenderse sobre una población completa, o que uno recesivo tienda a desaparecer».

Hardy y Weibnerg fueron los primeros en observar que la matemática avanzada podía servir bien a los intereses de la genética y el análisis de poblaciones. No fueron los únicos, ni tampoco los más destacados de los que seguirían esta vía. Así, en la década de 1920 surgieron las aportaciones de Alfred Lotka (1880-1949) y de Vito Volterra (1860-1940), que introdujeron sus ahora clásicos modelos del comportamiento dinámico de especies que compiten (presas-depredadores). Notables son en este sentido sus respectivos libros: *Elements of physical biology* (1924, posteriormente tomó el título, más adecuado, de *Elements of mathematical biology*), de Lotka, y *Leçons sur la théorie mathématique de la lutte pour la vie* (1931), de Volterra.

The genetical theory of natural selection

Un año antes de la aparición del libro de Volterra, se publicó un texto más fundamental para comprender los procesos evolutivos. Nos referimos a *The genetical theory of natural selection* (1930), del estadístico, genetista y eugenista británico Ronald A. Fisher (1890-1962), que entonces trabajaba en la Estación Experimental Rothamsted (en 1933 se convirtió en director del Departamento de Eugenesia del Colegio Universitario de Londres, y en 1943 pasó a ocupar la cátedra Balfour de Genética de la Universidad de Cambridge). *The genetical theory of natural selection* fue un libro capital en el renacimiento de la teoría de la evolución de Darwin. Lo que hizo Fisher fue aplicar los métodos matemáticos propios de la estadística para introducir la teoría de la selección natural de Darwin en el único territorio en el que realmente tiene lugar la evolución, el de la genética de poblaciones. Al hacerlo, contribuyó a elaborar una síntesis, informada por análisis matemáticos rigurosos, de la genética creada por Mendel y la teoría de Darwin.

Sin embargo, el uso de un nuevo método para estudiar los procesos evolutivos, un método que iba más allá de la biología y las ciencias naturales adentrándose con firmeza en el territorio de la matemática, no tuvo una aceptación fácil. Muchos de los profesionales de las ciencias biológico-naturales no comprendieron el enfoque de Fisher. Uno de los hijos del autor de *The origin of species*, Leonard Darwin (1850-1943), a quien, de hecho, estaba dedicado el libro («En gratitud por el ánimo dado al autor, durante los últimos quince años, discutiendo muchos de los problemas que se tratan en este libro»), se dio cuenta del problema y, tras recibir *The genetical theory of natural selection*, que Fisher le había enviado, escribió a este el 9 de junio de 1930:

No he tenido tiempo o cerebro para enfrentarme a su libro en serio. He leído el primer capítulo [...] con el resultado de que mi impresión de que será reconocido lentamente como una contribución muy importante al tema se ve confirmada. Sin embargo, no debe desanimarse con la recepción que reciba, sino confiar en los resultados últimos.

En su respuesta (12 de junio), Fisher apuntaba:

Me pregunto si cualquier biólogo seguirá el argumento del primer capítulo. Primero, porque siempre se espera de un primer capítulo que sea no solo elemental sino trillado, y segundo, porque todos hemos crecido en la mayor confianza de que sabemos todo lo que Darwin significa. Estoy muy cansado de ver expresadas algunas perogrulladas excesivamente vagas, tales como «todo tigre defectuoso debe ser devorado por tigres», presentada como prueba «de argumento darwiniano común» y ahora creo que en el prefacio debo haber martilleado con la afirmación de que en círculos biológicos las ideas de Darwin habitualmente se malinterpretan groseramente, aunque esto molestará a muchas personas.

Julian Huxley (1887-1975), otro conocido biólogo evolutivo, además de activo escritor, humanista y eugenista, que, como Leonard Darwin, pertenecía a una familia de abolengo en las ciencias naturales (era nieto del gran defensor de la teoría de Darwin, Thomas Henry Huxley), también recibió un ejemplar de *The genetical theory of natural selection*, que agradecía a Fisher en una carta del 4 de mayo de 1930:

Acabo de recibir su nuevo libro —desde el miércoles, cuando volví a casa, le he dedicado todo mi tiempo libre— y debo escribirle y felicitarlo por él. Me parece el libro más importante sobre evolución que ha aparecido este siglo.

Tendré que volver de nuevo sobre partes de él —las matemáticas no son mi punto fuerte, y eso aparte de que encuentro algunos pasajes muy oscuros ¡si se lo puedo decir!—, especialmente el capítulo sobre propiedades métricas.

Desearía haber sabido que estaba preparando este libro —me hubiera gustado que hubiéramos hablado sobre el asunto de la selección sexual— porque tengo ideas definidas acerca del valor de pájaros territoriales monógamos [...]. No puedo entender cómo puede omitir usted cualquier discusión sobre los artículos de Haldane. ¿No entran en su esquema? Tampoco menciona las ideas de [Charles Sutherland] Elton [en 1927 había publicado Animal ecology*]; me gustaría saber lo que piensa de estos [...].*

Está también el efecto selectivo de la migración. Por ejemplo, los Padres Peregrinos [el grupo religioso inglés que migró en América en 1620] no eran un ejemplo aleatorio de británicos, ni los primeros colonos australianos.

Las cartas anteriores apoyan la idea de que eran escasos los biólogos de la época que comprendían las matemáticas del libro, o que estaban acostumbrados al estilo matemático de razonar. Ello explica que, de las 1500 copias que se imprimieron, únicamente un tercio se vendieran el primer año, no agotándose el resto hasta 1947. Hoy, *The genetical theory of natural selection* es reconocido como una obra fundamental en la biología y genética evolutivas, que facilitó la aparición, bastantes años después, de otros textos fundamentales que seguían líneas parecidas, como *The theory of island biogeography* (1967), del ecólogo dotado

matemáticamente Robert MacArthur (1930-1972) y el entomólogo Edward O. Wilson (n. 1929), un texto clásico, fundacional de la ecología moderna.

Julian Huxley se sorprendía de que Fisher ignorase en su libro las contribuciones de John Burton S. Haldane (1892-1964), autor de otra obra influyente: *The causes of evolution* (1932). Haldane, Fisher y el estadounidense Sewall G. Wright (1889-1988) forman el gran trío de los fundadores de la genética de poblaciones. De hecho, Fisher y Haldane fueron compañeros durante algunos años en el Colegio Universitario de Londres. Aunque fue después de la publicación de *The genetical theory of natural selection*, estaban en desacuerdo con frecuencia. Esas opiniones diferentes afloraban en una carta que Haldane remitió a Fisher el 23 de marzo de 1930, cuando decía:

Discrepo de la afirmación de que los valores de los vínculos son eminentemente susceptibles de modificación selectiva [...]. La parte social es altamente controversial. Si usted me convence tendré que convertirme en una forma extrema de socialista, ya que la herencia de la propiedad debe tender a promover poblaciones infértiles, incluso con pensiones en el salario del 12 por ciento por hijo.

De todas maneras, Haldane recibió bien el libro de Fisher: en una reseña que publicó en *Mathematical Gazette* (1930) decía que *The genetical theory of natural selection* establecía los fundamentos de una nueva rama de la ciencia y «debería servir no solo para llevar la discusión del problema de la evolución a un nivel más alto, sino también para introducir a los matemáticos en un nuevo apartado de su disciplina».

Ante la buena recepción que su libro tuvo en Huxley y Haldane, Fisher escribía al primero el 6 de mayo de 1930:

Me siento extremadamente feliz de que opine bien de mi libro, y quiero agradecerle especialmente que haya escrito tan rápida y amablemente sobre él. La importancia que usted y Haldane le adjudican —y no existen en este país dos opiniones a las que yo otorgue más peso— me dan mucho placer, aunque no poco embarazo porque si hubiese tenido un propósito tan grande como escribir un libro importante sobre la evolución, habría tenido que intentar ofrecer una descripción de muchos trabajos sobre los que no estoy realmente cualificado para dar una opinión útil.

Y más adelante reconocía: «Una cosa que lamento mucho es no haber mencionado en el prefacio el estudio de Haldane como un ejemplo de trabajo preparatorio en los problemas biológicos, que me parecen tan necesarios».

Genética y futuro de la sociedad

El comentario crítico de Haldane antes citado revela otra faceta de *The genetical theory of natural selection* (cuyos últimos cinco capítulos incidían en apartados de naturaleza «social»; sus títulos eran *Hombre y sociedad*, *La herencia de la fertilidad humana*, *Reproducción en relación a la clase social*, *Selección social de la fertilidad* y *Condiciones de una civilización permanente*): que para Fisher (también para Haldane), la genética de poblaciones podía, y debía, arrojar luz sobre un asunto entonces en boga, la eugenesia, materia a la que estaba dedicada la cátedra de Fisher en el Colegio Universitario de Londres.

La correspondencia de Fisher sobre estos asuntos incluía (además de Haldane, Julian Huxley o Leonard Darwin) corresponsales como el escritor, hermano de Julian, Aldoux Huxley, quien escribía a Fisher el 26 de septiembre de 1931:

«Después de leer en su libro los efectos en la población humana de una organización social basada en la recompensa económica, ¡creo que tenemos derecho a una buena medida de oscuridad y alarma!».

Fisher y T. H. Morgan

Los años entre 1930 y 1932 fueron testigos de la publicación de un pequeño puñado, tres, de libros fundamentales para el «renacimiento» de la teoría darwiniana de la evolución de las especies. Además de *The genetical theory of natural selection* y de *The causes of evolution* de Haldane, el genetista estadounidense Thomas Hunt Morgan (1866-1945), recordado sobre todo por encontrar en la mosca *Drosophila melanogaster* un instrumento ideal para la experimentación genética, publicó en 1932 otra obra importante, aunque destinada más al lector general que al especializado: *The scientific basis of evolution*. Después de recibir un ejemplar del libro, el 11 de octubre de 1932 Fisher escribía a Morgan:

Como ve, me he tomado algún tiempo para considerar el gran libro [The scientific basis of evolution] que usted fue tan amable de enviarme. Pensé, sin embargo, que preferiría esto en lugar de que yo me formase una idea precipitada y por consiguiente inadecuada. Creo que estará de acuerdo conmigo en que una de las principales razones por las que, a pesar de levantar tanto polvo, no estamos progresando más rápidamente en esta generación es porque no nos damos unos a otros tiempo para asimilar realmente las ideas de los demás, de forma que todos los puntos difíciles, las cosas sobre las que realmente merece la pena pensar, tienen que ser pensadas individualmente algunos cientos de veces, con grandes variaciones en eficiencia y éxito.

No querrá usted que diga, lo que es obviamente cierto, que su libro constituirá durante muchos años un hito en el progreso de la genética, y en su aplicación a los problemas de la evolución.

Todavía hoy, casi un siglo después de aquellos intercambios, la evolución de las especies esconde aspectos que deben clarificarse, aunque ahora cuenta con una herramienta extraordinaria, la biología molecular. IyC

PARA SABER MÁS

Natural selection, heredity, and eugenics. Including selected correspondence of R. A. Fisher with Leonard Darwin and others. Dirigido por J. H. Bennet. Clarendon Press, Oxford, 1983.

The genetical theory of natural selection. R. A. Fisher. Editado por Henry Bennet. Oxford University Press, 2007.

EN NUESTRO ARCHIVO

Vito Volterra. Ana Millán Gasca en *IyC*, junio de 2009.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



¿Cuánto vale la suma de todos los números naturales?

Por qué decimos —y «medimos»— que 1 + 2 + 3 + 4 + ... = –1/12

Las series divergentes son invención del diablo, y cualquier demostración basada en ellas resulta infame.
—Niels Henrik Abel (1802-1829)

Como lo prometido es deuda, este mes trataremos una desconcertante cuestión que presentamos en forma de meme matemático en nuestra última columna. Me refiero a la pregunta que da título a este artículo: ¿cuánto vale la suma

$$S = 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + \cdots$$

de todos los números naturales?

Si es la primera vez que se lo plantea, es muy probable que su respuesta no tarde en llegar y que afirme sin dudarlo que dicha suma no existe como tal o que es divergente. Y aunque en cierto sentido tendría razón, a continuación veremos que un análisis más sutil permite asignar a dicha suma un valor sorprendente: –1/12. ¿Cómo es posible que una suma de infinitos enteros positivos dé como resultado un valor finito, negativo y fraccionario?

El significado de estas series ha ocupado a los matemáticos desde hace tiempo, y su historia ilustra a la perfección cómo el infinito se presta a generalizar nociones que creíamos básicas y asentadas, como la de suma. Pero tal vez lo más fascinante sea que tales elucubraciones no se restringen al abstracto mundo de las matemáticas puras, sino que han encontrado aplicaciones en problemas físicos que pueden medirse en el laboratorio.

Series demoníacas

Para abrir boca, comencemos por considerar la suma infinita

$$S_1 = 1 - 1 + 1 - 1 + \cdots,$$

estudiada en el siglo XVII por el monje matemático Luigi Guido Grandi. Observemos que podemos reagrupar los términos para reescribirla como

$$S_1 = 1 - (1 - 1 + 1 - 1 + \cdots) = 1 - S_1,$$

de donde podemos deducir inmediatamente que $S_1 = 1/2$.

Tomemos ahora la serie alternada de los números naturales:

$$S_2 = 1 - 2 + 3 - 4 + \cdots .$$

Al sumarla consigo misma, y añadiendo un cero a una de las series para trasladar una posición todos los sumandos, obtenemos la expresión

$$\begin{aligned} S_2 + S_2 &= (1-2+3-4+\cdots)+(0+1-2+3-4+\cdots) \\ &= (1+0)+(-2+1)+(3-2)+(-4+3)+\cdots \\ &= 1 - 1 + 1 - 1 + \cdots = 1/2 . \end{aligned}$$

Por lo que, despejando, obtenemos que $S_2 = 1/4$. Finalmente, si restamos esta última a la serie S de los números naturales, tendremos

$$\begin{aligned} S - S_2 &= (1+2+3+4+\cdots) - (1-2+3-4+\cdots) \\ &= (1+2+3+4+\cdots) + (-1+2-3+4+\cdots) \\ &= 0+4+0+8+\cdots \\ &= 4\cdot(1+2+3+4+\cdots) \\ &= 4S , \end{aligned}$$

de donde deducimos que $S - 1/4 = 4S$ y, por tanto,

$$S = -1/12.$$

Como decíamos al principio, este resultado es a todas luces absurdo: no solo hemos obtenido una cantidad finita, sino que, además, esta es fraccionaria y negativa. ¿Dónde está el error?

Parece que todo el argumento se sustenta en la «demostración» de que la endiablada serie de Grandi suma 1/2. Y, de hecho, observemos que también podemos «demostrar» que

$$S_1 = (1-1) + (1-1) + \cdots = 0 + 0 + \cdots = 0 ,$$

o que

$$S_1 = 1 - (1-1) + (1-1) + \cdots = 1 - 0 + 0 + \cdots = 1 .$$

De modo que, según cómo agrupemos los términos, obtenemos tres resultados distintos para la suma de una misma serie. ¿Qué está pasando aquí?

La suma de dos números es una operación binaria que nos devuelve otro número. Podemos extenderla a cualquier cantidad de sumandos usando las propiedades asociativa y conmutativa, las cuales nos aseguran que siempre obtendremos el mismo resultado sin importar en qué orden agreguemos o agrupemos los términos. Sin embargo, cuando intentamos sumar un número infinito de ellos, puede aparecer el diablo, como apuntaba el matemático Niels Henrik Abel en la cita que abre esta columna.

Que la suma de un número infinito de términos positivos pueda dar como resultado una cantidad finita ya generó debate desde la Antigüedad; como muestra de ello, baste recordar la paradoja de Zenón. Pero que, para algunas series, como la de Grandi, el orden en que se agruparan los sumandos condujera a resultados diferentes motivó agrias disputas.

Esa situación se prolongó hasta que los matemáticos del siglo XIX, con Augustin-Louis Cauchy a la cabeza, definieron rigurosamente el concepto de suma para el caso de las series. Según dicha definición, el resultado de sumar una serie infinita viene dado por el límite de sus sumas parciales (un término, dos, tres, etcétera) cuando el número de términos tiende a infinito; es decir:

$$S = \sum_{k=1}^{\infty} a_k = \lim_{n\to\infty} \sum_{k=1}^{n} a_k = \lim_{n\to\infty} S_n .$$

1 + 2 + 3 + 4 + ... = –1/12: UNA DEMOSTRACIÓN VISUAL

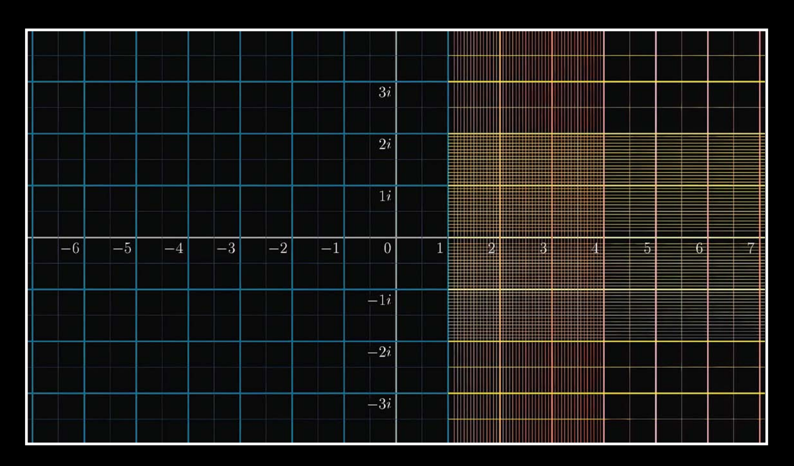
La manera más rigurosa de asignar un valor no divergente a la suma de todos los números naturales pasa por definir la «continuación analítica» de la función zeta de Riemann, $\zeta(s)$. Considerada en el siglo XVIII por Leonhard Euler para el caso de una variable real y más tarde por Bernhard Riemann para el caso complejo, $\zeta(s)$ es una de las funciones más importantes en teoría de números y otras áreas. ¿Podemos visualizarla?

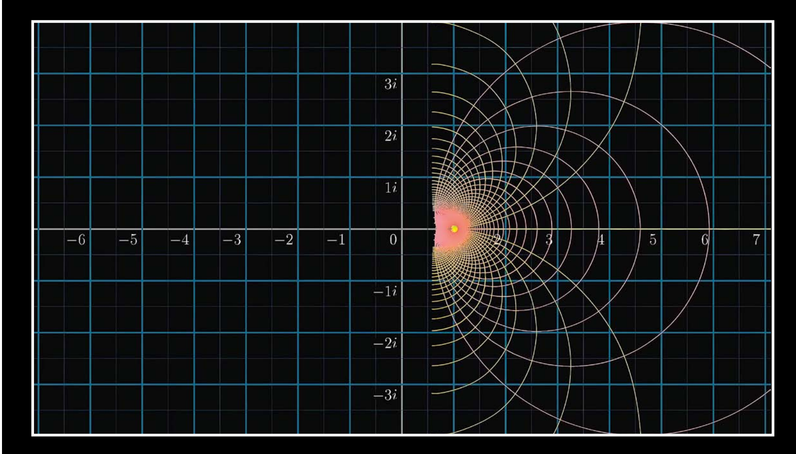
La función $\zeta(s)$ se define a partir de la serie infinita

$$\zeta(s) = 1/1^s + 1/2^s + 1/3^s + 1/4^s + \cdots,$$

donde $s = x + iy$ es un número complejo. De aquí vemos que el valor $s = -1$ correspondería a la suma de los números naturales. Sin embargo, $\zeta(s)$ solo está definida para valores de s con parte real mayor que 1; es decir, para la región del plano complejo situada a la derecha de la línea vertical $x = 1$.

▶ Para visualizar la gráfica de $\zeta(s)$, un buen método es el empleado por el matemático y divulgador Grant Sanderson en su canal de YouTube 3Blue1Brown. Esta técnica consiste en considerar la región del plano $x > 1$ (donde $\zeta(s)$ sí está definida) y trazar en ella una cuadrícula como la representada aquí (*tonos amarillos y naranjas*). Ahora podemos preguntarnos: ¿cómo se transforman las líneas que componen esta cuadrícula bajo la acción de $\zeta(s)$?



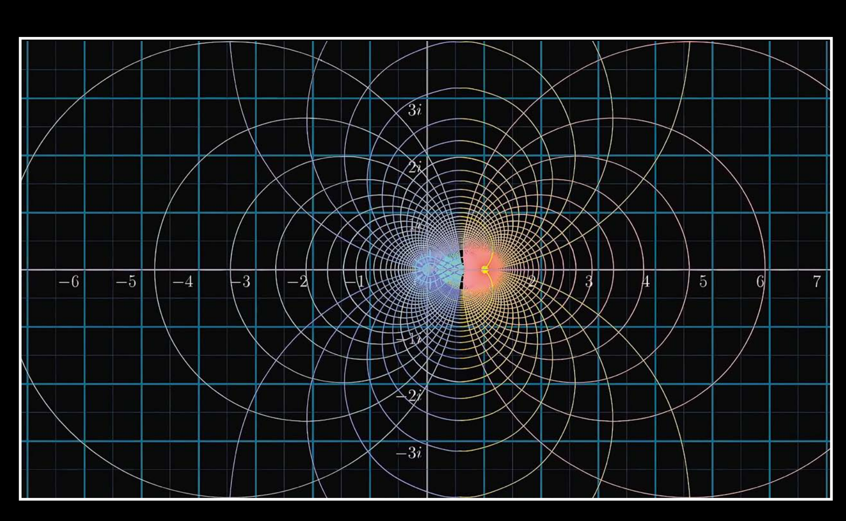


◀ La respuesta son los arcos que aparecen en esta segunda imagen. Vemos que los trazos son suaves, pero que se interrumpen bruscamente a la izquierda. Ello se debe a que $\zeta(s)$ no está definida para valores de s con parte real menor o igual que 1.

Sin embargo, es posible completar esta gráfica «de manera natural» en la parte izquierda del plano. Dicha extensión es única y se conoce como continuación analítica de $\zeta(s)$. Coincide con la función $\zeta(s)$ allí donde esta se encuentra definida, pero cubre también el resto del plano complejo (salvo el inevitable polo en $s = 1$).

▶ Si examinamos cómo se transforma la cuadrícula correspondiente (la que trazaríamos a la izquierda de la línea $x = 1$) bajo la acción de la continuación analítica de $\zeta(s)$, el resultado tiene el aspecto que muestra esta tercera imagen (*tonos azules*).

Es esta generalización de la función zeta de Riemman la que ahora sí está definida para $s = -1$ y que, por tanto, nos permite asignar un valor a la suma divergente $1 + 2 + 3 + 4 + \cdots$. Dicho valor resulta ser, en efecto, $\zeta(-1) = -1/12$.



GRANT SANDERSON, «VISUALIZING THE RIEMANN HYPOTHESIS AND ANALYTIC CONTINUATION»; HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=SD0NJBWQLYW, 9 DE DICIEMBRE DE 2016.

Hoy esto puede parecernos obvio, pero vale la pena recordar que no siempre lo fue.

Un ejemplo sencillo de la definición de Cauchy nos lo proporciona una vieja amiga de esta columna: la familia de series geométricas

$$S(x) = 1 + x + x^2 + \cdots ,$$

donde x es la razón. Resulta sencillo ver que la suma de los n primeros términos puede escribirse como

$$S_n(x) = \frac{1-x^{n+1}}{1-x} .$$

Y si ahora calculamos el límite cuando n tiende a infinito, vemos que, siempre que el valor absoluto de x sea estrictamente menor que 1, el término x^{n+1} del numerador tenderá a cero, lo que nos deja la expresión finita

$$S(x) = 1/(1 - x).$$

En caso contrario (cuando el valor absoluto de x es igual o mayor que uno), el límite no existe y decimos que la serie es divergente. En particular, el caso con $x = -1$ corresponde justamente a la serie de Grandi.

Si la serie es convergente, el límite en cuestión proporcionará un número bien definido. Pero si es divergente, su suma no estará definida, ya que el límite «explotará», como ocurre con la serie de los números naturales (cuyas sumas parciales son cada vez mayores), u «oscilará», como sucede con la serie de Grandi.

Esta forma de sumar una cantidad infinita de términos es lineal y proporciona resultados bien definidos cuando operamos con series convergentes: la adición de dos series convergentes corresponde a la adición de sus sumas, y el producto de un número por una serie convergente da como resultado la suma por dicho número. Esto nos permite realizar operaciones con series, como las utilizadas al comienzo de nuestra columna, pero ¡siempre y cuando estas no sean divergentes! Si lo son, su naturaleza demoníaca de la que nos advertía Abel puede conducirnos a un resultado infame.

Generalizar la suma

A pesar de todas sus virtudes, numerosos matemáticos pensaron que la definición de Cauchy para sumar series era insatisfactoria, ya que metía en el mismo saco a todas las series divergentes, entre las cuales sería deseable distinguir. Por esta razón, pronto aparecieron alternativas para sumar tales series divergentes, lo que en cierto modo permite cuantificar su comportamiento.

La suma de Cesàro, propuesta por Ernesto Cesàro en el siglo XIX, es uno de esos métodos alternativos capaces de asignar un valor finito a ciertas series divergentes. Para calcularla recurrimos también a un límite sobre las sumas parciales, pero en este caso sobre el promedio aritmético de las n primeras sumas parciales; es decir,

$$S = C\sum_{k=1}^{\infty} a_k = \lim_{n\to\infty} \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} S_k ,$$

donde hemos añadido el símbolo C delante del sumatorio para remarcar que estamos sumando «a la Cesàro», y ahora S_k denota la suma parcial de los primeros k términos: $a_1 + a_2 + \cdots + a_k$.

Veamos cómo este método sí que nos permite sumar la serie divergente de Grandi. Sus sumas parciales valen $S_k = 1$ si k es impar y $S_k = 0$ si k es par. De modo que la media de las sumas parciales da lugar a la sucesión

$$1/1 , 1/2 , 2/3 , 2/4 , 3/5 , 3/6 , \ldots$$

y, por tanto,

$$C\sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{n+1} = \lim_{n\to\infty} \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} S_k = \frac{1}{2} .$$

Decimos que esta serie es divergente pero sumable por el método de Cesàro con valor 1/2. Si una serie converge a un valor dado mediante la suma tradicional, también convergerá al mismo valor con la suma de Césaro. Además, esta forma de sumar también es lineal.

Un requisito necesario para que una serie converja es que su término general tienda a cero. Probablemente a partir de esta idea, Abel propuso otro método alternativo para sumar ciertas series divergentes. Para ello, si tenemos una serie dada por

$$S = a_0 + a_1 + a_2 + a_3 + \cdots ,$$

construimos primero a partir de ella la familia de series

$$S(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \cdots .$$

Si el valor absoluto de x es menor que 1, estaremos «amortiguando» cada vez más los sucesivos términos de la serie original gracias a las potencias de x. Y si ahora tomamos el límite en el que x tiende a 1, nuestro amortiguamiento se irá haciendo cada vez más débil hasta desaparecer. Esto dará como resultado la suma estándar si la serie es convergente. Pero, al mismo tiempo, nos brinda la posibilidad de asignar un valor bien definido a algunas series divergentes.

Si aplicamos el método de Abel a la serie de Grandi, obtendremos el mismo resultado que sumando con la técnica de Cesàro. De hecho, cualquier serie sumable por el método Cesàro puede sumarse con el de Abel y sus valores coincidirán. Pero «Abel lava más limpio»: es un método más potente, dicen los matemáticos, porque permite sumar más series divergentes que el de Cesàro.

Por ejemplo, la serie alternada de los naturales, $S_2 = 1 - 2 + 3 - 4 + \cdots$ no es sumable por el método de Cesàro, pero sí por el de Abel. Para verlo, notemos que el polinomio en x que debemos construir para aplicar el método de Abel coincide con el desarrollo de Taylor en $x = 0$ de la siguiente función:

$$\frac{1}{(1 + x)^2} = 1 - 2x + 3x^2 - 4x^3 + \cdots .$$

Esta igualdad es válida cuando el valor absoluto de x es menor que 1. Y ahora, acercándonos «por la izquierda» a 1 tanto como podamos, obtenemos que

$$\mathcal{A}\sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k+1}\, k = \lim_{x\to 1^-} \frac{1}{(1+x)^2} = \frac{1}{4} .$$

Volvamos a subrayar que no estamos sumando al uso la serie divergente; ya sabemos que eso no es posible, y de ahí la $\mathcal{A}$ que acompaña al sumatorio. Estamos asignando como «suma» a una serie divergente el límite de las sumas de series convergentes que están cada vez más y más cercanas a ella.

Más allá de los reales

Esta conexión entre nuestras series y las series de potencias nos invita a saltar al plano complejo, donde sorprendentemente muy a menudo se iluminan los rincones más oscuros de los números reales. Retomemos la familia de series geométricas pero en variable compleja:

$$S(z) = 1 + z + z^2 + z^3 + \cdots ,$$

donde ahora $z = x + yi$ es un número complejo. En la situación particular en la que $y = 0$, recuperaremos el caso de los números reales. Estas series son convergentes para aquellos valores de z con módulo menor que 1; es decir, para los puntos del interior de un círculo de radio unidad centrado en el origen del plano complejo.

Si de la familia de series geométricas tomamos la de $z = -1$, estaremos frente a la serie divergente de Grandi, que con el método de Abel suma

$$\mathcal{A}\sum_{k=1}^{\infty}(-1)^{k+1} = \lim_{z\to -1}\frac{1}{1-z} = \frac{1}{2}\ .$$

Observemos que cuando antes hablábamos del desarrollo de Taylor estábamos haciendo aparecer una función. Y si interpretamos la familia de series $S(z)$ como una función en variable compleja, la función que nos encontramos es

$$S(z) = 1/(1-z)\ .$$

Sin embargo, esta solo es analítica para valores de z pertenecientes al interior del círculo unidad.

A pesar de ello, a partir de $S(z)$ es posible construir otra función, $F(z)$, definida más allá de ese círculo pero de modo que, en el interior, se cumpla la igualdad $F(z) = S(z)$. Es decir, $F(z)$ concuerda con $S(z)$ en todos los puntos en los que esta última se encuentra definida, pero se extiende más allá de su ámbito original.

Dicha función se conoce como la continuación, la prolongación o la extensión analítica de $S(z)$. Y repito el uso del artículo «la», ya que una propiedad clave es que la continuación analítica es única, debido a la fuerte restricción que imponemos al obligar que la función extendida sea analítica.

En particular, la continuación analítica de $S(z)$ en $z = -1$ vale $F(-1) = 1/2$, el valor que nos proporciona el método de Abel. De hecho, la continuación analítica probablemente sea el método más usado para «sumar» series divergentes.

La función zeta

Pero ¿es verdad o no que la serie de los naturales suma −1/12? Fue Euler quien primero llegó a este resultado. Lo hizo a través de la famosa función zeta de Riemann:

$$\zeta(s) = 1^{-s} + 2^{-s} + 3^{-s} + 4^{-s} + \cdots,$$

en la que s es un número complejo. Si tomamos el valor $s = -1$, recuperamos la serie de los números naturales. No obstante, puede verse que $\zeta(s)$ solo está definida para valores complejos con parte real mayor que 1.

Euler sabía que $\zeta(s)$ no estaba definida para $s = -1$. A pesar de ello no se amedrentó y, al multiplicarla por 2^{-s}, obtuvo

$$2^{-s}\,\zeta(s) = 2^{-s} + 4^{-s} + 6^{-s} + 8^{-s} + \cdots\ .$$

Sustrajo dos veces la segunda ecuación de la primera,

$$(1 - 2^{1-s})\,(1^{-s} + 2^{-s} + 3^{-s} + 4^{-s} + \cdots)$$
$$= 1^{-s} - 2^{-s} + 3^{-s} - 4^{-s} + \cdots\ ,$$

y aun sabiendo que ambas series divergían en $s = -1$, evaluó ambos miembros de la igualdad en dicho valor para obtener la expresión:

$$-3(1 + 2 + 3 + 4 + \cdots) = 1 - 2 + 3 - 4 + \cdots.$$

Y como por un método semejante al de Abel había determinado que la serie alternada de los naturales sumaba 1/4, concluyó que

$$1 + 2 + 3 + 4 + \cdots = -1/12.$$

Tuvo que pasar mucho tiempo hasta que, ya en el siglo xx, el genio matemático indio Srinivasa Ramanujan desarrolló un método que, al aplicarlo a la función zeta de Riemann, conseguía extenderla analíticamente a todo el plano complejo (menos el polo $s = 1$). Y, en efecto, la técnica de Ramanujan da como resultado

$$\zeta(-1) = -1/12.$$

O lo que es lo mismo: si sumamos «a la Ramanujan», entonces

$$\mathcal{R}\sum_{k=1}^{\infty}k = -\frac{1}{12}\ .$$

Es en este sentido, en el de Ramanujan, en el que es rigurosamente cierto que la «suma» de los números naturales da como resultado −1/12.

De las matemáticas a la física

Si desean profundizar en el tema, les recomiendo el artículo que el medallista Fields Terry Tao escribió en su blog y que cito en la bibliografía. Pero si quieren comenzar de nuevo con más calma, vean el vídeo que los *youtubers* matemáticos de Numberphile le dedicaron.

Básicamente se trata de la «demostración» con la que arranca esta columna. Pero tuvo una tremenda repercusión en las redes sociales y, en muy poco tiempo, superó el millón de visitas. Las respuestas de otros *youtubers* y divulgadores matemáticos no se hicieron esperar. Al respecto, les recomiendo la que hicieron los chicos de Mathologer, tanto por el contenido como para que se asombren ante una burla pedante de vergüenza ajena.

Salvando los duelos entre *youtubers* matemáticos, tal vez lo más extraordinario de este resultado es que tenga aplicaciones físicas. Por ejemplo, se emplea en teoría de cuerdas para explicar por qué la cuerda bosónica necesita un espaciotiempo de 26 dimensiones. Y aunque hasta ahora nadie ha observado que el espacio tenga más dimensiones que las tres a las que estamos acostumbrados, estas series aparecen también en el cálculo del efecto Casimir: la fuerza atractiva que experimentan dos placas conductoras debido a las fluctuaciones cuánticas del vacío. Dicho efecto fue predicho por el físico Hendrik Casimir en 1948 y en las últimas décadas ha sido verificado numerosas veces en el laboratorio.

En el cómputo teórico de la fuerza de Casimir aparece una serie divergente semejante a la de los naturales que arroja un valor infinito. Por supuesto, una opción es suponer que la teoría es incorrecta. Pero otra es asumir una «débil amortiguación» desconocida, similar a la que hemos descrito en el método de Abel, o una familia más general de funciones de corte semejante a la que describe Tao en su artículo, lo que resulta equivalente a suponer que su valor correcto es el correspondiente a la función zeta de Riemann extendida al punto adecuado.

Al hacerlo, obtenemos un valor finito para la serie divergente... que mágicamente conduce a los valores medidos en el laboratorio. He aquí otro memorable ejemplo de «la irrazonable eficacia de las matemáticas» para describir el mundo. IyC

PARA SABER MÁS

The Euler-Maclaurin formula, Bernoulli numbers, the zeta function, and real-variable analytic continuation. Terry Tao en **terrytao.wordpress.com**, 10 de abril de 2010.

ASTOUNDING: 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + ... = −1/12. Numberphile. **www.youtube.com/watch?v=w-I6XTVZXww**, 9 de enero de 2014.

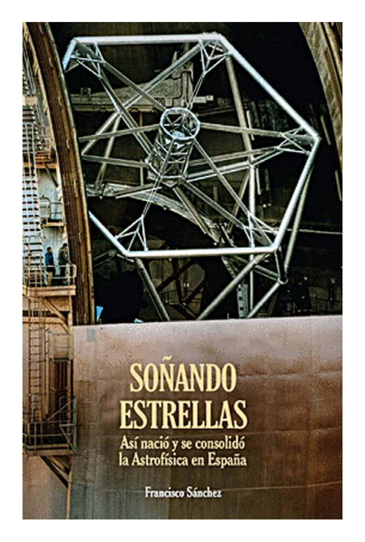
Sum of natural numbers (second proof and extra footage). Numberphile. **www.youtube.com/watch?v=E-d9mgo8FGk**, 11 de enero de 2105.

Visualizing the Riemann hypothesis and analytic continuation. 3Blue1Brown. **www.youtube.com/watch?v=sD0NjbwqlYw**, 9 de diciembre de 2016.

Numberphile v. math: The truth about 1 + 2 + 3 + ... = −1/12. Mathologer. **www.youtube.com/watch?v=YuIIjLr6vUA**, 13 de enero de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

El efecto Casimir. Eduardo Elizalde en *IyC*, marzo de 2019.



SOÑANDO ESTRELLAS
ASÍ NACIÓ Y SE CONSOLIDÓ LA ASTROFÍSICA EN ESPAÑA

Francisco Sánchez
Instituto de Astrofísica de Canarias, 2019
420 págs.

La historia del Instituto de Astrofísica de Canarias

Origen y desarrollo de un modelo que acabaría situando a Canarias en el centro de la astronomía mundial

Francisco Sánchez llegó a Tenerife en 1961 con el encargo del Consejo Superior de Investigaciones Científicas de evaluar la pureza de los cielos para efectuar observaciones astronómicas en los picos adyacentes al Teide. Recién licenciado en física y especializado en óptica, aquel viaje lo convirtió en astrofísico y en un apasionado del cielo canario. Toledano de origen, hizo de aquellas cumbres su hogar y en ellas fundó primero una familia y después el embrión de lo que sería el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), inaugurado oficialmente en 1982 y dirigido por él mismo hasta 2013.

Soñando estrellas contiene sus memorias científicas e institucionales. Con una prosa amena y plagada de anécdotas jugosas, «Paco» describe al detalle la singularísima aventura que situó a Canarias en el mapa de la astrofísica mundial. Es, por tanto, una historia de la astrofísica en España. Y aunque esta puede y debe completarse con la de otros centros, es un lujo disponer de una versión de primera mano, contada con atención a los cambiantes contextos económicos y políticos, y propia de quien los ha sufrido y los ha sabido aprovechar. También puede leerse como una guía para la organización de la investigación científica en ambientes no siempre favorables y en un país científicamente periférico pero con bazas con las que negociar con los más grandes.

El libro, que cuenta con versión inglesa, está prologado nada menos que por Brian May, mítico guitarrista de Queen y de los primeros investigadores doctorales que acogió el observatorio de Tenerife. Sus 24 capítulos, cortos y directos, están ilustrados por fotografías e imágenes históricas que los hacen aún más legibles e informativos. Es cierto que la obra contiene más detalles sobre el politiqueo necesario para sacar adelante el IAC y sobre la fabricación e instalación de los instrumentos que información sobre avances científicos. Pero estos últimos (con descubrimientos de posibles agujeros negros, enanas marrones y otros muchos) son públicos y notorios. Los primeros, en cambio, el lector solo los encontrará aquí o en los archivos. Y si cambiamos «politiqueo» por «relaciones legales e institucionales, mercadotecnia y diplomacia científica internacional», comprobaremos que nos hallamos ante un valioso documento de cómo funciona la ciencia más allá de los eslóganes y las buenas palabras.

Que las estrellas titilen es un efecto óptico causado por las perturbaciones atmosféricas. Isaac Newton predijo, sin subirse a ningún pico, que su observación desde altitudes mayores a los 2000 metros sería mucho más nítida. A mediados del siglo xix, el astrónomo Charles Piazzi Smyth, alentado por la fama internacional otorgada a Tenerife por expedicionarios de la talla de Alexander von Humboldt, comprobó esta predicción experimentalmente con mediciones a diferentes altitudes a lo largo de la isla (de las que, según explica Sarah Dry en su reciente *Waters of the world,* aprendió tanto de la propia atmósfera terrestre como de los astros).

Fue ahí donde empezó la fama internacional del cielo canario. A ello siguieron varias expediciones internacionales y la creación del observatorio meteorológico militar de Izaña, a los pies del Teide. En 1959, un nutrido grupo internacional de astrónomos fue a Tenerife a observar un eclipse total de Sol. Esto puso a la isla en el radar de los astrónomos españoles (José María Torroja y el padre Antonio Romañá), y el Observatorio del Teide, que por entonces existía prácticamente solo sobre el papel, contrató al joven licenciado Sánchez para redactar un informe sobre la visibilidad del cielo en Izaña.

Como hiciera un siglo antes Piazzi Smyth, Sánchez dedicó su viaje de bodas a su primera expedición a Tenerife: «Entramos en el atormentado paisaje de las Cañadas del Teide. Penetramos en un mal país arado por cíclopes, con montones de enormes pellas basálticas rojipardas, cual "almendras garrapiñadas" gigantes, salpicadas de obsidiana de un negro azabache brillante. Ríos secos de lava petrificada cayendo desde las cumbres formaban al llegar a la gran caldera de las Cañadas encrespados mares de piedra en movimiento, pese a su quietud de siglos».

Para llevar a cabo la tarea encomendada, Sánchez hubo de aprender astrofísica como pudo. Por ejemplo, con un viaje de formación a Bélgica y Francia en 1962. Allí decidió ampliar los planes originales e improvisó el primer acuerdo internacional para traer un telescopio, en este caso uno de Burdeos especializado en luz zodiacal [*véase* «Luz zodiacal», por Francisco Sánchez y Antonio Mujica: Investigación y Ciencia, mayo de 1977].

El acierto de Sánchez fue establecer este acuerdo como modelo de otros, que, en la siguiente década, fueron trayendo instrumentos de observación y expertos extranjeros. España pondría el cielo, y los países más punteros la tecnología y el conocimiento científico. En explícita oposición al modelo colonial que, en lugares como Chile, había malvendido terrenos para mayor gloria de astrónomos y astrofísicos de países pudientes, Sánchez exigía que los acuerdos incluyeran formación de investigadores españoles. El Tratado Multinacional de Astronomía, firmado en 1978, ratificó dicho modelo.

En los años sesenta, el empeño y la voluntad de este joven entusiasta suplían las carencias económicas y científicas de un proyecto que partía de él y de sus colaboradores más que de las altas instancias de la investigación española. Pero también es verdad que, en el camino, contó tanto con ayudas técnicas puntuales (por ejemplo, del Instituto de Óptica del CSIC y

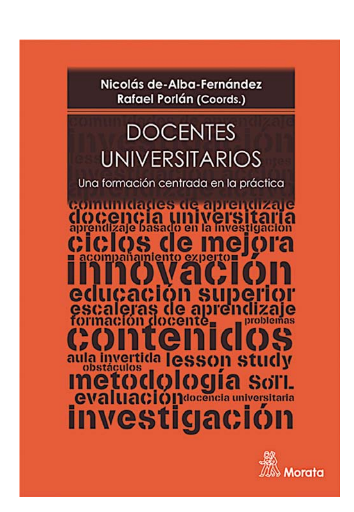
de la Junta de Energía Nuclear) como con aliados políticos y económicos.

En 1969, y en un panorama dominado por astrónomos (que en la España del momento eran matemáticos dedicados a calcular posiciones), Sánchez se doctora con una tesis explícitamente astrofísica; disciplina que, más allá de posiciones, no temía adentrarse en la estructura, composición y origen de los cuerpos celestes. En 1970 introduce cursos de astrofísica en La Laguna y, en 1973, logra la creación del Instituto Universitario de Astrofísica, adscrito a esa Universidad, así como la primera cátedra de astrofísica en España. Como estrategia para afianzar la disciplina, se hace vicerrector. Las revueltas estudiantiles le llevan a ser nombrado rector en funciones en enero de 1978. Y, a principios de los años ochenta, abandona la docencia y su propia investigación para evitar interferencias con su tarea organizativa [*véase* «Francisco Sánchez: Gestor estelar», por Alina Quevedo; Investigación y Ciencia, octubre de 1997].

Entretanto, el IAC fue creciendo en autonomía, instrumentos, colaboraciones internacionales e investigadores. Obstáculos como la envidia, la competencia por recursos o la cerrazón burocrática e ideológica se vencieron con tesón y aliados potentes. Algunos hitos fueron la instalación de talleres de instrumentación en 1975; la adición del Observatorio del Roque de los Muchachos en 1979; la creación de un comité evaluador externo en 1983; la presentación al público internacional en 1985 (en unos fastos llenos de reyes y aristócratas); la Ley del Cielo de 1988 (y la creación, años después, de certificados Starlight); el lanzamiento de la Escuela de Invierno de Astrofísica de las Islas Canarias en 1989; la fundación, en 1992, de la Sociedad Española de Astronomía; la inauguración en 1993 del Museo de la Ciencia y el Cosmos de Tenerife; el diseño de carga científica de cohetes espaciales en los años noventa, y, muy destacadamente, la instalación del Gran Telescopio Canarias (GTC) en 2007. Con 10,4 metros de diámetro, el mayor telescopio óptico-infrarrojo del mundo fue diseñado y construido casi íntegramente por empresas españolas.

Pero no todo son éxitos en la historia del Instituto de Astrofísica de Canarias. Sin ir más lejos, el propio GTC no recibe los fondos necesarios para su total aprovechamiento. En el libro se describen más anhelos frustrados, como el intento de convencer en 2008 al Gobierno de España para que apoyara la candidatura de Canarias al supertelescopio europeo. Como en una buena novela de aventuras, la consolidación de la astrofísica en España ha seguido vericuetos sorprendentes y a veces angustiosos. Lo bueno es que el final está aún muy lejos de escribirse.

—Lino Camprubí
Universidad de Sevilla



DOCENTES UNIVERSITARIOS
UNA FORMACIÓN CENTRADA EN LA PRÁCTICA
Dirigido por Nicolás de Alba Fernández
y Rafael Porlán
Morata, 2020
336 págs.

La enseñanza como disciplina académica

Fundamentos, modelos y pruebas empíricas para abordar la formación del profesorado universitario

Siempre es una buena noticia la publicación de un libro. Pero más aún cuando, como en este caso, la obra trata una cuestión de actualidad y lo hace aunando el rigor académico con la polifonía de voces y la pluralidad de experiencias. Estos rasgos justifican por sí solos el interés de este libro coral, cuya lectura resultará útil para todas aquellas personas interesadas en uno de los puntos clave para la mejora de la calidad de la enseñanza universitaria: la formación pedagógica de su profesorado.

Pocos profesores universitarios se mostrarán en desacuerdo con el punto de partida del libro: su práctica docente no se despliega en correspondencia con las numerosas pruebas empíricas que nos ofrece la investigación sobre la superioridad de los enfoques pedagógicos centrados en el estudiante y su actividad, comparados con aquellos determinados por el contenido de los programas y que adoptan modalidades didácticas transmisivas y unidireccionales. La tradicional preponderancia de la investigación en el trabajo del profesorado universitario, así como la legitimación de su sistema de recompensas como la única vía para el progreso en la carrera académica, ha condenado a la función docente a un papel secundario, cuando no marginal. *Docentes universitarios* constituye un valioso antídoto contra esa estrecha concepción de la profesión y ofrece algunas ideas y resultados que pueden contribuir a mejorar los procesos de formación pedagógica de los que tan necesitada está la universidad.

Una de las mejoras más relevantes pasa por que la formación pedagógica del profesorado tenga como origen y destino su propia manera de comprender y desplegar el trabajo docente. Pero, dado que esta afirmación soporta más de una interpretación, es legítima y deseable una cierta pluralidad en las iniciativas que tratan de desarrollarla. Articulados en dos partes, los nueve capítulos de la obra ofrecen una panorámica muy actual sobre los procesos de enseñanza centrados en el aprendizaje y sobre la problemática de la formación pedagógica de los docentes. De esta última se analizan algunos de sus referentes teóricos con el fin de elucidar sus claves teóricas y prácticas, y ayudar así a comprender el sentido conceptual y el alcance metodológico de la modalidad de formación, cuyos resultados se muestran en los últimos capítulos.

El libro se inicia con un interesante capítulo en el que dos profesores, conocidos por su capacidad de innovación docente, nos muestran pruebas de la robustez y



la eficiencia didáctica de las pedagogías centradas en la persona que aprende. El capítulo encierra una pequeña paradoja. Por un lado, la obra muestra de manera convincente la necesidad de extender y sistematizar los programas de formación pedagógica del profesorado. Sin embargo, no parece que los dos magníficos ejemplos de buenas prácticas docentes que se nos presentan al principio se hayan desarrollado como consecuencia de la participación de sus protagonistas en un dispositivo formal e instruccional de formación docente.

La solución de esta aparente paradoja puede encontrarse, en parte, en el tercer capítulo, donde se sistematiza la noción de *scholarship of teaching and learning*, o «estudio sistemático de la enseñanza y el aprendizaje» propuesta en 1990 por Ernest Boyer, a la sazón presidente de la influyente Fundación Carnegie. Este concepto, que busca redignificar el papel de la enseñanza en el trabajo académico, viene a señalar que los profesores deberían tratar su docencia con los mismos cánones intelectuales que aplican a su investigación disciplinar: sistematizarla conceptualmente, documentarla empíricamente y hacerla pública para que sea considerada por la comunidad de pares académicos. Más aún, el problema de la enseñanza y el aprendizaje de una disciplina debe plantearse desde la propia investigación disciplinar. No en vano, la misma noción de disciplina ya incorpora en su seno la pregunta por el origen, la producción y la difusión del saber que la constituye.

Es cierto, como se señala en la obra, que adoptar dicho enfoque no equivale a una buena enseñanza. Pero no lo es menos que las buenas prácticas que se nos muestran lo son, en parte, porque están basadas en una cierta sistematización que estos profesores hacen de la docencia universitaria, así como en la generación de pruebas empíricas relativas al proceso y resultados de sus prácticas docentes, y en la difusión de su trabajo —en este libro— para que sea considerado por pares externos. Es de agradecer, también, la llamada a tratar con el merecido rigor este poliédrico concepto, no sea que vaya a sufrir la desnaturalización que ya experimentó la noción de «práctica reflexiva» o el abuso descontextualizador al que ha sido sometido el concepto de «comunidad de práctica».

Que la investigación en la acción (I-A) esté presente en el núcleo de muchos de los programas internacionales más avanzados en la formación del profesorado no es ninguna sorpresa. Más novedosa es su reciente vinculación a un sistema de trabajo con el que comparte algunas similitudes procedimentales, pero del que la separan sus referentes culturales, teóricos y epistemológicos: el llamado *lesson study*, o «estudio de lecciones», el cual se recoge en el capítulo segundo. Este método consiste en un proceso cíclico en el que un grupo de profesores se junta para diseñar una sesión de clase, impartirla, observarla y reflexionar sobre ella en busca de futuras mejoras. Una serie de interesantes ejemplos de universidades norteamericanas y europeas muestran la pujanza de este planteamiento colegiado de análisis y mejora de la práctica docente, que ya está siendo aplicado en algunos programas de formación del profesorado en universidades de nuestro contexto.

La obra ofrece una interesante sistematización conceptual de la investigación sobre programas de formación del profesorado, en la que aparece ya el Programa de Formación e Innovación Docente del Profesorado (FIDOP) de la Universidad de Sevilla, que será uno de los hilos conductores del libro. Son de destacar algunos resultados que enfatizan la necesidad del trabajo docente colegiado, de un enfoque formativo experiencial, o de una formación que combine la innovación y el cambio docente con la documentación de esos procesos. La parte nuclear de la obra presenta de hecho el FIDOP basándose en los Ciclos de Mejora en el Aula (CIMA), la investigación que se desarrolló para conocer los efectos del programa en términos de progresión docente y los resultados de esta. También se presenta la estructura del CIMA como componente principal del Curso General de Docencia Universitaria (CGDU). Es de agradecer el detalle con el que se describen ambos, ya que para muchos desarrolladores de programas de formación del profesorado puede constituir un banco de ideas y sugerencias de mejora.

Docentes universitarios explica el proceso de investigación desarrollado para poner a prueba los efectos del FIDOP así como sus prometedores e interesantes resultados. Los autores proponen cuatro modelos de práctica docente, de menos a más deseable: transmisivo, transmisivo abierto a los estudiantes, de resolución de problemas cerrados, y constructivista; dos provenientes de la bibliografía y dos de los resultados de la investigación. Estos modelos permiten clasificar todo tipo

de enfoques y prácticas existentes en la docencia universitaria, y se utilizan para explicar los procesos de cambio y evolución en las concepciones y prácticas de los docentes que participan en el FIDOP. Cada uno de esos modelos, a su vez, está compuesto por cuatro elementos: contenidos, metodología, evaluación y concepción epistemológica de la disciplina.

En esa clasificación que pretende ser exhaustiva, y aun aceptando la necesidad de cierta organización y modelización del saber disponible, podría colarse de soslayo el riesgo de una cierta estereotipación. No es fácil imaginar, de entrada, que una práctica tan dinámica y compleja como la docente pueda ser subsumida por completo en uno u otro modelo, ni tampoco que estos sean mutuamente excluyentes. ¿Los cuatro elementos cambian al unísono cuando se transita de un modelo a otro? ¿Es posible que la práctica docente de un determinado profesor pueda presentar rasgos pertenecientes a más de un modelo? Pensemos por ejemplo en un profesor de física que, manteniendo epistemologías disciplinares relativistas pertenecientes al cuarto modelo (por la mañana en clase explica las leyes del paradigma newtoniano, mientras que por la tarde en el laboratorio trabaja con el paradigma cuántico), imparte sus clases de manera magistral, de acuerdo con el primer modelo.

El libro concluye con la exposición de dos estudios que ilustran los procesos de transformación y cambio que, como consecuencia de su paso por el programa, experimentaron las concepciones docentes de dos profesoras. No querría acabar esta reseña sin manifestar mi sentimiento de complicidad con muchas de las ideas que se exponen a lo largo de la obra. El resultado es un volumen de gran interés y con potencial de convertirse en motor de debate y reflexión para todos aquellos académicos interesados en la búsqueda de mejores prácticas en la formación del profesorado universitario. Por esta única razón valdría ya la pena darle la bienvenida.

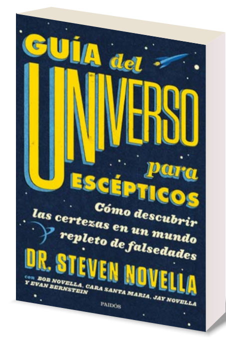
—José Luis Medina Moya
Facultad de Educación,
Universidad de Barcelona

NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



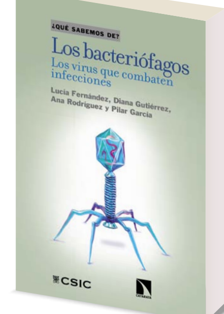
LA FRONTERA DEL CEL
TOT ALLÒ QUE ET CAL SABER SOBRE TOT-EL-QUE-HI-HA
Roberto Trotta
Institució Alfons el Magnànim, 2020
ISBN: 978-84-7822-846-1
108 págs. (12 €)



GUÍA DEL UNIVERSO PARA ESCÉPTICOS
CÓMO DESCUBRIR LAS CERTEZAS EN UN MUNDO REPLETO DE FALSEDADES
Steven Novella
Paidós, 2020
ISBN: 978-84-493-3695-9
544 págs. (26 €)



LOS BACTERIÓFAGOS
LOS VIRUS QUE COMBATEN INFECCIONES
Lucía Fernández, Diana Gutiérrez, Ana Rodríguez y Pilar García
Catarata/CSIC, 2020
ISBN: 978-84-9097-986-0
96 págs. (12 €)



LAS REGLAS DEL CONTAGIO
CÓMO SURGEN, SE PROPAGAN Y DESAPARECEN LAS EPIDEMIAS
Adam Kucharski
Capitán Swing, 2020
ISBN: 978-84-121979-5-2
352 págs. (22 €)





UN CIENTÍFICO EN EL ARMARIO
PÍO DEL RÍO HORTEGA Y LA HISTORIA DE LA CIENCIA ESPAÑOLA
Elena Lázaro Real
Next Door Publishers, 2020
ISBN: 978-84-121598-3-7
176 págs. (19 €)



CIENCIA, Y EL «COSMOS» DEL SIGLO XXI
Varios autores
Prólogo de Jon Lomberg
Coordinado por Alicia Parra Ruiz y Quintín Garrido Garrido
278 págs.

Descargable gratuitamente en cienciayelcosmosdelsigloxxi.blogspot.com/

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

OCTUBRE



1970



1920



1870

1970

La agradable vida en las afueras

«Un desplazamiento masivo desde el centro de las ciudades a las zonas periféricas, que supuso todo un bum poblacional en el Oeste y el Suroeste, y un ritmo de crecimiento de la población menor en los años 1960 que en los 1950, son hechos que destacan entre los resultados preliminares del censo de 1970 publicado por la Agencia del Censo de EE.UU. El movimiento hacia el extrarradio fue generalizado. Su extensión la revela el hecho de que 13 de las 25 mayores ciudades perdieran población, mientras que 24 de las 25 de las mayores áreas metropolitanas la ganaran. El caso de Washington D.C. fue característico: la población de la ciudad varió poco entre 1960 y 1970, pero su área metropolitana aumentó en 800.000 habitantes, o más del 38 por ciento.»

1920

Avión carguero

«La máquina propuesta, conocida como *Pelican Four-Ton Lorry*, es un colosal monoplano de ala cantiléver diseñado para dos motores Napier de 460 caballos. Su velocidad de crucero es de 116 kilómetros por hora. Su peso total llegará a los 11.000 kilogramos. Su carga útil es de cuatro toneladas, con suficiente combustible para el viaje entre Londres y París. Pero lo más interesante es el novedoso sistema de carga y descarga rápida de diseño específico. Este permite manejar los cargamentos con la máxima celeridad y se basa en una práctica similar a la habitual en los camiones. Los aviones sin funcionar suponen la inactividad de una gran masa de capital, por lo cual los diseñadores planean mantener en vuelo al aparato durante la mayor parte del tiempo.»

Cloro desinfectante

«Señala el doctor Charles Baskerville que, aunque los datos obtenidos hasta hoy sobre el cloro y la gripe no permiten extraer conclusiones, los hechos tal como han quedado establecidos harían aconsejable que los médicos experimentaran con aire clorado diluido como profiláctico en epidemias tales como las de la reciente gripe. El doctor Baskerville determinó en qué medida esta enfermedad afectaba gravemente a los obreros de las fábricas en cuyas atmósferas se hallaron cantidades pequeñas de cloro. Muchos a los que se pidió información expresaron la opinión de que los trabajadores que manejan cloro están perceptiblemente libres de catarros y otras enfermedades respiratorias.»

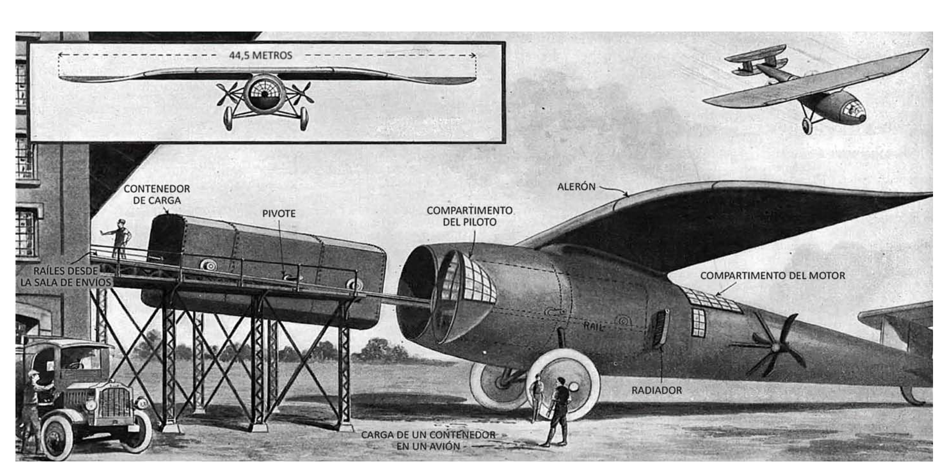
1870

Auge del telégrafo

«El rápido progreso del telégrafo durante los últimos veinticinco años ha cambiado por completo los sistemas sociales y económicos del planeta. Sus ventajas y posibilidades eran tan evidentes que, inmediatamente tras su presentación y evidenciarse su auténtica naturaleza, se hicieron los máximos esfuerzos para poner sus virtudes al alcance de toda comunidad que deseara seguir el ritmo de avance de los tiempos modernos. El morse, su sistema de señales, pareció por algún tiempo un logro perfecto, hasta que el profesor Royal E. House asombró al mundo con su aparato telegráfico impresor, o teletipo. Hoy, casi toda gran extensión de agua está atravesada, o lo estará pronto, por los delgados cables que enlazan continentes e islas y que prácticamente unen a toda la raza humana en una única gran familia.»

Auroras boreales

«Últimamente se han visto unas brillantes muestras de aurora boreal, y hay indicios de que este otoño y el invierno que le siga se producirán una sucesión de espléndidas exhibiciones aurorales; estas van acompañadas de la perturbación magnética y la interrupción de la telegrafía usuales. Se desconoce aún la verdadera naturaleza de esos fenómenos, pero parece caber poca duda de que se trata de fenómenos eléctricos inducidos por la acción de las perturbaciones solares. La fotosfera solar se halla en un estado de gran agitación, y así lleva algún tiempo. A veces las manchas han sido tan extensas que casi se veían a simple vista. En la superficie de nuestro astro rey tienen lugar unos ciclones y tormentas de una extensión y una violencia casi inconcebibles para nosotros, y las auroras que hacen radiantes y hermosas a nuestras noches son, de algún modo no descubierto, el resultado de esas terribles manifestaciones.»



1920: Idea para el transporte aéreo. Lo avanzado no era solo el avión; lo era también su contenedor, que podía cargarse y descargarse con rapidez.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXXIII, N.º 15, 9 DE OCTUBRE DE 1920


COVID-19
UN RETO CIENTÍFICO Y SOCIAL

Fallece Francisco Gracia Guillén, fundador y primer director de *Investigación y Ciencia*

Sin él, la revista simplemente no existiría (o sería otra diferente)

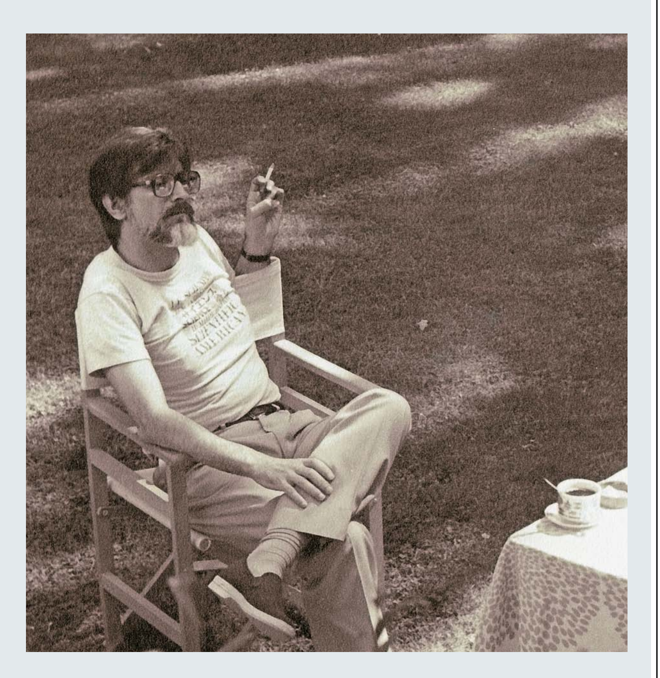
El pasado día 14 de agosto falleció Francisco Gracia Guillén, el que fuera fundador de *Investigación y Ciencia* y su director durante largo tiempo. Profesional con brillante trayectoria, destacó por su interés por la ciencia, entendida como pensamiento contrastado y creación intelectual sometida siempre a revisión. Era consciente de su importancia en todos los aspectos de la vida del hombre, en su desarrollo, en la cultura y en la organización de los sistemas sociales y económicos.

Abogado y filósofo de formación, Gracia destacó por su afición a las innovaciones técnicas. Se manejaba con soltura de profesional en el uso de transistores y válvulas. Pertenecía a un selecto grupo de discípulos de José Luis López Aranguren en la Facultad de Filosofía de Madrid. De hecho, dio clases de ética y sociología en la Complutense durante un breve intervalo de tiempo. Escribió incluso algún ensayo inédito sobre ética sin religión. Por encima de todo, le atraía la filosofía analítica, el llamado Círculo de Viena, cuya historia tradujo al español. Compendió ensayos sobre el lenguaje en un volumen muy apreciado.

En los años 70 recaló en Editorial Labor como representante de Unión Explosivos Rio Tinto, quien en ese momento era accionista mayoritario de la empresa. Y en 1974 fue nombrado director general, cargo que desempeñó hasta 1989.

Lector empedernido, Gracia había sido un fiel seguidor de la revista estadounidense *Scientific American*, por lo que gestó la idea de trasladar sus contenidos al idioma español para poder difundirlos en España y todos los países hispanohablantes. Así fue como surgió el proyecto de *Investigación y Ciencia*.

Tras un año largo de gestiones correosas ante los propietarios y directivos de *Scientific American*, muy celosos del prestigio internacional alcanzado, Gracia consiguió que se concedieran a Editorial Labor los derechos de traducción. La oposición, que la hubo, procedió del interior. Se manifestaron no pocas reticencias iniciales de personajes que se suponían eximios expertos en el sector. Contó, sin embargo, con el apoyo de quienes fueron sus jefes en Rio Tinto, en particular, con José María Naharro, que fue presidente de Prensa Científica (editorial que publica *Investigación y Ciencia*) durante años. El equipo neoyorquino dio el visto bueno al proyecto después de conocer a quienes se iban a responsabilizar del mismo en su dirección y redacción. Tras la japonesa y la italiana, llegó así la edición española, una de las más veteranas, pues, en la constelación de naciones que se han venido sumando con los años. Hombre perfeccionista, Gracia procuró que aquel proyecto, balbuceante, saliera con luz propia desde el primer número, en octubre de 1976. Fue su director hasta 2002.



CON CAMISETA de *Scientific American* durante una reunión familiar celebrada en San Rafael (Segovia), en agosto de 1986.

Gracia era un auténtico amante de la tecnología (de todas las secciones de *Investigación y Ciencia*, su favorita era «Taller y laboratorio» —*Amateur scientist* en la versión original—, que pretendía recoger lo que en las ingenierías españolas se llamaba prácticas de taller, y en las facultades de ciencias, prácticas de laboratorio). De hecho, fue pionero al concebir la importancia de la informática en los procesos editoriales. Tal es así que llegó a construirse su propio ordenador personal. Seguramente *Investigación y Ciencia* fue una de las revistas adelantadas en su aplicación práctica.

Consciente del carácter colectivo de la tarea científica, mostró siempre una gran capacidad de liderazgo y promovió una estrecha colaboración entre todos los miembros del equipo. Los que le conocimos y trabajamos mano a mano con Paco tuvimos la suerte de convivir con un hombre inteligente, sensato, intuitivo, leal y generoso que ha dejado huella en todos nosotros. Descanse en paz.

Pilar Bronchal Garfella, exdirectora de Prensa Científica.
José Mª Valderas Gallardo, exdirector de Prensa Científica y de Investigación y Ciencia.

CORTESÍA DE VICTORIA GRACIA



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay
DESARROLLO DIGITAL
Marta Pulido Salgado
PRODUCCIÓN
M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA
Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN
Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES
Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Laura Helmuth
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Andrés Martínez: *Apuntes* y *El ascenso de los robles y las encinas*; José Óscar Hernández Sendín: *Apuntes* y *Las limitaciones del PIB*; Fabio Teixidó: *Apuntes* y *La encrucijada de la biomasa*; Pedro Pacheco: *La supervivencia del más amable*; Xavier Roqué: *Ciencia, cientificismo e identidad humana*; Lorenzo Gallego: *El estigma de la adicción*; M. Gonzalo Claros: *Nuevos fármacos contra las enfermedades minoritarias* y *Prevenir la enfermedad priónica*; Javier Grande: *Centrifugadoras caninas*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova
17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España